

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

Výpočty zkratových poměrů  
Calculations of Short Circuits Conditions

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Petr Čermák**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Výpočty zkratových poměrů  
Calculations of Short Circuits Conditions

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky zkratů a metodiky výpočtu
2. Tepelné účinky zkratových proudů
3. Dynamické účinky zkratových proudů

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, SNTL Praha, 1987
2. Hradílek Z.: Elektroenergetika I a II. Skripta VŠB-TU, 1992 a 1993
3. Normy ČSN
4. Další literatura podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Petru Krejčímu, PhD za jeho rady a odbornou pomoc při vytváření této práce.

V Ostravě dne 28. 4. 2017

  
.....

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá zkraty a jejich účinky. Nejprve jsou popsány příčiny vzniku zkratů a jejich nepříznivé účinky. V další části je rozdělení zkratů podle několika kritérií. Můžeme zde najít také obecné časové průběhy zkratů, ale také simulace různých druhů zkratu pomocí programu. Je zde vysvětlena metoda výpočtu zkratových proudů a potřebné výpočty impedancí podle normy ČSN EN 60909-0. Druhá polovina této práce se zabývá účinky zkratových proudů. Nejprve je vysvětleno tepelné působení zkratového proudu a jaké nepříznivé účinky na vodiče a zařízení v elektrizační soustavě má. Obdobně je popsáno silové působení v další kapitole. Na závěr je ukázán příklad na výpočet zkratového proudu v zadané části elektrické sítě.

## **Klíčová slova**

zkrat, rázový zkratový proud, nárazový zkratový proud, zkratová impedance, sousledná složka, zpětná složka, nulová složka, ekvivalentní oteplovací proud

**Abstract**

This bachelor thesis deals with short circuits and their effects. First, the causes of shorts in circuits and their adverse effects are described. In the next section there is a division of short circuits according to several different criteria. Here you are find, using the program, general short-circuits but also simulation of different types of short circuit. The method of calculating short-circuit currents is explained and the necessary impedance calculations according to ČSN EN 60909-0. The second half of the thesis deals with the effects of short-circuit currents. First, the thermal effect of the short-circuit current is explained and what adverse effects it has on wires and equipment of the power system. The explanation of the force effect follows up in next chapter. Finally, an example is given for calculating the short-circuit current in the specified part of the electrical network.

**Key words**

short-circuit, short-circuit current, initial short-circuit current, peak short-circuit current, short-circuit impedance, positive-sequence, negative-sequence, zero-sequence, thermal equivalent short-circuit current

# Obsah

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Seznam použitých symbolů a zkratk .....                                     | 8  |
| Seznam ilustrací .....                                                      | 11 |
| Seznam tabulek .....                                                        | 12 |
| 1 Úvod .....                                                                | 13 |
| 1.1 Cíle .....                                                              | 13 |
| 2 Základní pojmy (definice) .....                                           | 14 |
| 2.1 Elektrizační soustava .....                                             | 14 |
| 2.2 Zkrat .....                                                             | 14 |
| 2.3 Přechodový jev .....                                                    | 14 |
| 3 Zkraty .....                                                              | 15 |
| 3.1 Příčiny vzniku zkratu .....                                             | 15 |
| 3.1.1 Poškození izolace .....                                               | 15 |
| 3.1.2 Úder blesku .....                                                     | 15 |
| 3.1.3 Porušení izolátoru .....                                              | 15 |
| 3.2 Účinky zkratů .....                                                     | 15 |
| 3.3 Druhy zkratů .....                                                      | 16 |
| 3.4 Časové průběhy zkratů .....                                             | 19 |
| 3.4.1 Simulace průběhů zkratových proudů .....                              | 20 |
| 3.5 Metody výpočtu zkratů .....                                             | 24 |
| 3.5.1 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu .....                      | 24 |
| 3.5.2 Použití souměrných složek .....                                       | 26 |
| 3.5.3 Předpoklady pro výpočet .....                                         | 28 |
| 3.5.4 Postup při výpočtu zkratů .....                                       | 28 |
| 3.5.5 Vzorce pro výpočet zkratových impedancí .....                         | 29 |
| 3.5.6 Počáteční rázový zkratový proud .....                                 | 33 |
| 3.5.7 Nárazový zkratový proud .....                                         | 34 |
| 4 Tepelné účinky zkratů .....                                               | 36 |
| 4.1 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud .....                            | 36 |
| 4.2 Výpočet teplení a jmenovité hustoty krátkodobého výdržného proudu ..... | 39 |
| 4.3 Výpočet krátkodobé tepelné odolnosti pro různé doby trvání zkratu ..... | 40 |
| 5 Dynamické účinky zkratů .....                                             | 41 |
| 5.1 Tuhé vodiče – elektromagnetické síly a výpočty .....                    | 41 |

|       |                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.1 | Trojfázový zkrat – výpočet vrcholové síly mezi hlavními vodiči .....        | 42 |
| 5.1.2 | Dvojfázový zkrat – výpočet vrcholové síly mezi dvěma hlavními vodiči .....  | 42 |
| 5.1.3 | Výpočet vrcholové síly mezi hlavními a souběžnými dílčími vodiči .....      | 42 |
| 5.1.4 | Výpočet účinné vzdálenosti mezi hlavními vodiči a mezi dílčími vodiči ..... | 43 |
| 5.2   | Ohebné vodiče.....                                                          | 44 |
| 5.2.1 | Vodorovné hlavní vodiče .....                                               | 45 |
| 6     | Výpočet zkratů zadané sítě.....                                             | 48 |
|       | Závěr .....                                                                 | 58 |
|       | Použitá literatura .....                                                    | 59 |

## Seznam použitých symbolů a zkratk

| Symbol     | Popis                                                      | Jednotka            |
|------------|------------------------------------------------------------|---------------------|
| $A$        | počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$           | (A)                 |
| $A_s$      | průřez dílčího vodiče                                      | (mm)                |
| $a$        | poměr mezi nesouměrným proudem a trojfázovým proudem       | (-)                 |
| $a_f$      | osová vzdálenost mezi vodiči                               | (m)                 |
| $a_m$      | účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči                     | (m)                 |
| $a_s$      | účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči                      | (m)                 |
| $c$        | napěťový součinitel                                        | (-)                 |
| $d$        | geometrická střední vzdálenost mezi vodiči                 | (m)                 |
| $E_{eff}$  | skutečný modul pružnosti v tahu                            | (N/m <sup>2</sup> ) |
| $F$        | síla působící mezi dvěma rovnoběžnými vodiči při zkratu    | (N)                 |
| $F'$       | síla působící na jednotku délky hlavního ohebného vodiče   | (N)                 |
| $F_{m3}$   | vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu | (N)                 |
| $F_{m2}$   | vrcholová síla mezi hlavními vodiči při dvojfázovém zkratu | (N)                 |
| $F_s$      | vrcholová síla mezi hlavními a souběžnými dílčími vodiči   | (N)                 |
| $F_{st}$   | statická tahová síla ohebného hlavního vodiče              | (N)                 |
| $f$        | frekvence zdroje                                           | (Hz)                |
| $f_{es}$   | ekvivalentní statický průhyb vodiče uprostřed rozpětí      | (m)                 |
| $g$        | tíhové zrychlení                                           | (m/s <sup>2</sup> ) |
| $I_k$      | ustálený zkratový proud                                    | (A)                 |
| $I_k''$    | počáteční souměrný rázový zkratový proud                   | (A)                 |
| $I_{kQ}''$ | počáteční souměrný rázový zkratový proud                   | (A)                 |
| $I_{k1}''$ | počáteční jednofázový souměrný rázový zkratový proud       | (A)                 |
| $I_{k2}''$ | počáteční dvojfázový souměrný rázový zkratový proud        | (A)                 |
| $I_{k3}''$ | počáteční trojfázový souměrný rázový zkratový proud        | (A)                 |
| $I_{L1}$   | proud první fáze                                           | (A)                 |
| $I_{L2}$   | proud druhé fáze                                           | (A)                 |
| $I_{L3}$   | proud třetí fáze                                           | (A)                 |
| $I_{LR}$   | záběrný proud asynchronního motoru                         | (A)                 |
| $I_{rM}$   | jmenovitý proud asynchronního motoru                       | (A)                 |
| $I_{rR}$   | jmenovitý proud reaktoru                                   | (A)                 |
| $I_{rT}$   | jmenovitý proud transformátoru                             | (A)                 |
| $I_{th}$   | ekvivalentní oteplovací zkratový proud                     | (A)                 |
| $i_1, i_2$ | okamžité hodnoty proudu                                    | (A)                 |
| $i_{d.c.}$ | stejnosměrná složka zkratového proudu                      | (A)                 |
| $i_p$      | nárazový zkratový proud                                    | (A)                 |
| $K_G$      | korekční součinitel                                        | (-)                 |
| $k_{In}$   | součinitel pro zjištění účinné vzdálenosti vodiče          | (-)                 |
| $L$        | indukčnost                                                 | (H)                 |
| $L_1$      | první fáze                                                 | (-)                 |



|                             |                                                                                           |              |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| $l$                         | délka vodičů                                                                              | (m)          |
| $l_s$                       | maximální vzdálenost mezi dvěma sousedícími spojovacími díly (délka lana hlavního vodiče) | (m)          |
| $l_v$                       | délka lana klesačky                                                                       | (m)          |
| $m_i$                       | součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky proudu                                  | (-)          |
| $m_s$                       | hmotnost dílčího vodiče na jednotku délky                                                 | (kg/m)       |
| $N$                         | úroveň tuhosti uspořádání s hlavními vodiči                                               | (1/N)        |
| $n$                         | počet vodičů ve svazku                                                                    | (-)          |
| $n_i$                       | součinitel pro tepelné účinky střídavé složky proudu                                      | (-)          |
| $P_{krT}$                   | jmenovité ztráty nakrátko                                                                 | (W)          |
| $R$                         | činný odpor                                                                               | ( $\Omega$ ) |
| $R_L$                       | rezistivita vedení nebo kabelu                                                            | ( $\Omega$ ) |
| $R_{L20}$                   | rezistence při 20°C                                                                       | ( $\Omega$ ) |
| $R_M$                       | činný odpor asynchronního motoru                                                          | ( $\Omega$ ) |
| $R_T$                       | činný odpor transformátoru                                                                | ( $\Omega$ ) |
| $r$                         | poloměr jednoduchého vodiče                                                               | (mm)         |
| $r_g$                       | poměr síly vyvolané zkratem a síly gravitační                                             | (-)          |
| $S_{rM}$                    | jmenovitý zdánlivý výkon asynchronního motoru                                             | (VA)         |
| $S_{rT}$                    | jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru                                                   | (VA)         |
| $T$                         | perioda kmitání vodiče                                                                    | (s)          |
| $T_k$                       | celková doba trvání zkratu                                                                | (s)          |
| $T_{ki}$                    | doba trvání jednotlivých zkratů                                                           | (s)          |
| $T_{res}$                   | výsledná doba kmitu mechanického kmitání při průchodu zkratového proudu                   | (s)          |
| $\Delta t$                  | časové zpoždění spínání fází                                                              | (s)          |
| $t_r$                       | převod transformátoru                                                                     | (-)          |
| $U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(3)}$ | napětí sousledné, zpětné a netočivé složky soustavy                                       | (V)          |
| $U_{rG}$                    | jmenovité napětí generátoru                                                               | (V)          |
| $U_{rM}$                    | jmenovité napětí asynchronního motoru                                                     | (V)          |
| $U_{rT}$                    | jmenovité napětí transformátoru                                                           | (V)          |
| $U_n$                       | jmenovité napětí soustavy, sdružené                                                       | (V)          |
| $U_{nQ}$                    | jmenovité sdružené napětí nahrazované sítě                                                | (V)          |
| $u_{kR}$                    | jmenovité napětí nakrátko reaktoru                                                        | (%)          |
| $u_{kr}$                    | jmenovité napětí nakrátko                                                                 | (%)          |
| $u_{Rr}$                    | činná složka jmenovitého napětí nakrátko                                                  | (%)          |
| $X_M$                       | reaktance asynchronního motoru                                                            | ( $\Omega$ ) |
| $X_T$                       | reaktance transformátoru                                                                  | ( $\Omega$ ) |
| $x_d''$                     | poměrná rázová reaktance generátoru                                                       | (%)          |
| $Z_G$                       | rázová impedance generátoru v sousledné soustavě                                          | ( $\Omega$ ) |
| $Z_{GK}$                    | korigovaná impedance synchronního generátoru                                              | ( $\Omega$ ) |
| $Z_M$                       | impedance asynchronního motoru                                                            | ( $\Omega$ ) |
| $Z_Q$                       | impedance síťového napaječe                                                               | ( $\Omega$ ) |
| $Z_R$                       | impedance reaktoru                                                                        | ( $\Omega$ ) |

|                |                                                                                |                           |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| $Z_T$          | impedance transformátoru                                                       | ( $\Omega$ )              |
| $\alpha$       | teplotní součinitel                                                            | (K)                       |
| $\delta_I$     | úhel výsledné působící síly                                                    | ( $^\circ$ )              |
| $\Theta_e$     | teplota vodiče na konci zkratu                                                 | ( $^\circ\text{C}$ )      |
| $\kappa$       | součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu                            | (-)                       |
| $\mu_0$        | absolutní permeabilita vakua                                                   | (H/m)                     |
| $\rho$         | rezistivita (měrný odpor)                                                      | ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) |
| $\sigma_{fin}$ | nejnižší hodnota namáhání lana, kdy se modul pružnosti v tahu stává konstantní | (N/m <sup>2</sup> )       |
| $\varphi_{rG}$ | fázový úhel mezi $I_{rG}$ a $U_{rG}/\sqrt{3}$                                  | ( $^\circ$ )              |

## Seznam ilustrací

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 3.1 - trojfázový zkrat [4] .....                                                                 | 16 |
| Obr. 3.2 - trojfázový zemní zkrat [4] .....                                                           | 16 |
| Obr. 3.3 - dvojfázový zkrat [4].....                                                                  | 17 |
| Obr. 3.4 - dvojfázový zemní zkrat [4] .....                                                           | 17 |
| Obr. 3.5 - jednofázový zkrat [4] .....                                                                | 17 |
| Obr. 3.6 - průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu [5] .....                            | 19 |
| Obr. 3.7 - průběh zkratového proudu elektricky blízkého zkratu [5] .....                              | 20 |
| Obr. 3.8 - průběh zkratového proudu ve stejnosměrném obvodu .....                                     | 21 |
| Obr. 3.9 - průběh zkratového proudu ve střídavém jednofázovém obvodu .....                            | 21 |
| Obr. 3.10 - průběh zkratového proudu ve střídavém trojfázovém obvodu (sepnutí v čase $t=0s$ ).....    | 22 |
| Obr. 3.11 - průběh zkratového proudu ve střídavém trojfázovém obvodu (postupné spínání) .....         | 22 |
| Obr. 3.12 - průběh napětí a proudu při vypínání obvodu bez uvažování oblouku .....                    | 23 |
| Obr. 3.13 - průběh napětí a proudu při vypínání obvodu s působením oblouku [8] .....                  | 24 |
| Obr. 3.14 - schéma soustavy [5].....                                                                  | 25 |
| Obr. 3.15 - náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy [5].....                                 | 25 |
| Obr. 3.16 - Sousledná složka zkratové impedance $Z_{(1)}$ [5].....                                    | 26 |
| Obr. 3.17 - zpětná složka zkratové impedance $Z_{(2)}$ [5].....                                       | 27 |
| Obr. 3.18 - netočivá (nulová) složka zkratové impedance $Z_{(0)}$ [5] .....                           | 27 |
| Obr. 3.19 - zkrat napájen ze sítě v bodě Q bez transformátoru (+ náhradní schéma) [5].....            | 29 |
| Obr. 3.20 - zkrat napájen ze sítě v bodě Q s transformátorem (+ náhradní schéma) [5].....             | 29 |
| Obr. 4.1 - součinitel m pro zjištění tepelného účinku stejnosměrné složky zkratového proudu [5] ..... | 38 |
| Obr. 4.2 - součinitel n pro zjištění tepelného účinku střídavé složky zkratového proudu [5] .....     | 38 |
| Obr. 4.3 - plné čáry - měď; čárkované čáry - nízkolegovaná ocel [7].....                              | 39 |
| Obr. 4.4 - hliník, slitina hliníku, hliníkový vodič s ocelovým jádrem (AlFe) [7] .....                | 40 |
| Obr. 5.1 - součinitel $k_{In}$ pro zjištění účinné vzdálenosti vodiče [7] .....                       | 44 |
| Obr. 6.1 - schéma zadané sítě.....                                                                    | 48 |
| Obr. 6.2 - náhradní schéma zadané sítě (sousledná složka) .....                                       | 49 |
| Obr. 6.3 - zjednodušené náhradní schéma sítě (sousledná složka).....                                  | 51 |
| Obr. 6.4 - zjednodušené náhradní schéma sítě (sousledná složka).....                                  | 52 |
| Obr. 6.5 - zjednodušené náhradní schéma sítě (sousledná složka).....                                  | 52 |
| Obr. 6.6 - náhradní schéma (nulová složka).....                                                       | 53 |
| Obr. 6.7 - zjednodušené náhradní schéma (nulová složka) .....                                         | 54 |

## Seznam tabulek

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 - napět'ový činitel $c$ [5].....                                                       | 25 |
| Tabulka 2 - doporučené nejvyšší provozní teploty u mechanicky namáhaných vodičů při zkratu [7] . | 39 |

# 1 Úvod

Tématem mé bakalářské práce jsou zkratky. Toto téma je pro energetiku velmi důležité z toho důvodu, že zkrat je porucha a ty jsou v běžném provozu nežádoucí – snažíme se jím předejít. I přes všechny moderní technologie, které v dnešní době máme, zkratky v sítích nastávají. Jedná se dokonce o jednu z nejčastějších poruch v přenosu elektrické energie, a proto se snažíme elektrickou soustavu dimenzovat tak, aby zkratům odolala. Kombinací ochran a jistících prvků chráníme ty nejdražší součásti, což jsou alternátory, transformátory a velké motory.

V první části této práce se věnuji zkratům jako takovým. Uvádím zde účinky a rozdělení zkratů. Zkratky lze dělit podle několika parametrů

- podle počtu zkratovaných fází
- zda se jedná o elektricky blízký zkrat
- přes co zkratový proud při zkratu prochází

V další části vysvětluji metodiky výpočtů zkratů a předpoklady pro výpočet minimálních a maximálních zkratových proudů. Pomocí těchto výpočtů je možné zjistit, jak máme dimenzovat zařízení, aby maximálním zkratovým proudům odolala nebo na jaké hodnoty (minimální) se musí nastavit ochrany. V dnešní době je ochrana osob na prvním místě, a je proto nutné být v tomto směru velmi opatrný a zařízení a ochrany konstruovat tak, aby nedošlo k újmě na zdraví.

V druhé polovině práce se zaměřuji spíše na účinky zkratových proudů. V první řadě jsou to tepelné účinky, kdy při průchodu zkratového proudu dochází k výraznému oteplení vodiče. My musíme vodiče a zařízení dimenzovat tak, aby po určitou dobu těmto tepelným účinkům odolaly, než zareagují ochrany a přeruší průchod zkratového proudu. To samé platí pro dynamické účinky zkratového proudu. Při zkratu jsou vodiče namáhány silami, které mohou vodič vychýlit z jeho klidového stavu a poškodit ho nebo části s ním spojené (izolátory, přípojnice apod.).

V další části této práce předkládám ukázkou výpočtu části sítě, ve které nastane zkrat (výpočet trojfázového, dvofázového i jednofázového nárazového zkratového proudu).

## 1.1 Cíle

Cílem této bakalářské práce je rozbor problematiky zkratů. V první části se budu zabírat teorií o samotných zkratech a postupně se dostanu i k výpočtům zkratových proudů. Po výpočetní části se opět vrátím k teorii a ta se bude zabývat negativními účinky zkratových proudů. Pokusím se obecně rozebrat problematiku tepelných a dynamických účinků. V konečné části přiložím vypočtený příklad zadané sítě.

## **2 Základní pojmy (definice)**

### **2.1 Elektrizační soustava**

Elektrizační soustava je soubor všech částí elektrické sítě, které jsou vodivě spojeny. Obsahem jsou tedy elektrárny, vedení, transformátory, měřicí a ochranné prvky, ale také všechny spotřebiče připojené na síť. [1]

### **2.2 Zkrat**

Nejčastější poruchou v elektrizační soustavě je zkrat. Jedná se o vodivé spojení dvou různých fází nebo fáze a země, jestliže má soustava uzemněný uzel. Při zkratu vznikají obrovské proudy, které mají za následek tepelné a silové působení na vodiče nebo zařízení. [2]

### **2.3 Přechodový jev**

Přechodový jev vzniká při změně zátěže nebo poruše (zkratu) v elektrizační soustavě. Jedná se o děj, při kterém soustava přechází z jednoho stavu do druhého. V tomto případě ze stavu bezporuchového do zkratu. Při tomto přechodu se razantně mění hodnoty proudů, a tedy i energie soustavy. [3]

## 3 Zkrat

### 3.1 Příčiny vzniku zkratu

#### 3.1.1 Poškození izolace

Pokud poškodíme izolaci vodiče, je pravděpodobné, že dojde ke zkratu. Ať už se jedná o izolovaný kabel nebo vinutí transformátoru, je izolace velmi důležitá. K jejímu poškození může dojít hned z několika důvodů. Jeden nejčastějších je poškození tepelným působením. Průchodem proudu se vodič ohřívá, to znamená, že se ohřívá také izolace. Existují různé druhy izolací, které lze rozdělit do takzvaných teplotních tříd, viz tabulka.

#### 3.1.2 Úder blesku

Další možností, proč může zkrat vzniknout, je úder blesku. Ten má napětí několik milionů voltů, proud několik tisíc ampér a teplotu mezi 20 až 30 tisíci °C. Ačkoliv jsou všechny sloupy a stožáry elektrického vedení chráněny bleskosvody, tak stále existuje možnost, že blesk udeří přímo do lana vedení případně do zemnicího lana, ze kterého může zpětným přeskokem vzniknout oblouk mezi fází a zemnicím lanem.

#### 3.1.3 Porušení izolátoru

Izolátor slouží k oddělení vodivých částí vedení (lan) od sloupů, respektive stožárů. Musí mít dobré mechanické vlastnosti, jelikož na něm visí lano o váze desítek až stovek kilogramů. To způsobuje namáhání, a v určitých situacích jako jsou nepříznivé atmosférické podmínky, může dojít k poškození izolátoru a následnému pádu lana na zem, což znamená jednofázový zkrat.

### 3.2 Účinky zkratů

#### Dynamické

- Prochází-li vodičem jakýkoliv proud, tak se v jeho okolí vytváří magnetické pole. Při jmenovitých hodnotách, na které jsou vodiče dimenzovány, nás tyto účinky nemusí nijak zajímat. Naopak při zkratu, kdy vodičem teče několikrát větší proud, musíme s těmito účinky počítat a zařízení dimenzovat tak, aby těmito silovým účinkům odolalo. [6]

#### Tepelné

- Stejně jako v případě dynamických účinků, kdy vzniká při průchodu proudu magnetické pole, tak dalším účinkem tohoto procházejícího proudu je oteplování vodiče. Při jmenovitých hodnotách proudu opět tento problém nemusíme brát v potaz. Při zkratu však mohou být tepelné účinky natolik nežádoucí, že mohou například roztavit izolaci nebo poškodit další součástky okolo vodiče, které nejsou na takové tepelné zatížení navrženy. [6]

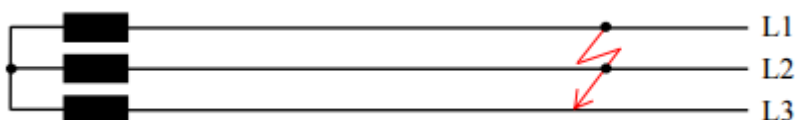
### Pokles napětí

- Při teoretickém ideálním zkratu (neboli spojení nakrátko) uvažujeme, že protékající proud je nekonečný, odpor je nulový a napětí se též blíží k nule. To však v praxi nikdy nenastane, jelikož neexistují vodiče s nulovým odporem. Proto se také určují zkratové impedance, z nichž následně určujeme zkratové proudy. Pokud tedy odpor není nulový, znamená to, že napětí „pouze“ poklesne, ale nebude nula. To je však velmi nežádoucí účinek, který může poškodit stroje připojené k síti, kde nastal zkrat. [6]

## 3.3 Druhy zkratů

### Souměrné zkraty

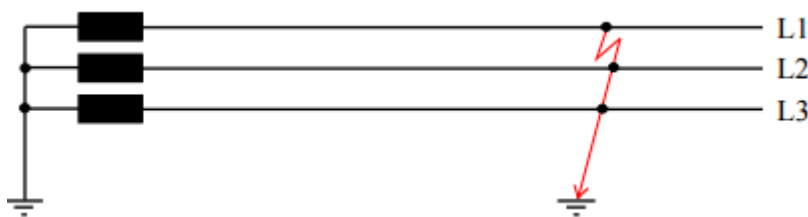
#### Trojfázový zkrat



Obr. 3.1 - trojfázový zkrat [4]

- Trojfázový zkrat vzniká při spojení všech tří fází. Při tomto druhu zkratu protéká všemi vodiči stejný zkratový proud, tudíž jsou všechny fáze postiženy stejně – proto se nazývá souměrný zkrat. Vyskytuje se převážně u kabelových vedení, kde nejčastěji dojde k porušení izolace a vodivému spojení vodičů. Při tomto druhu zkratu protéká vodiči nejvyšší hodnota zkratového proudu. [4]

#### Trojfázový zemní zkrat



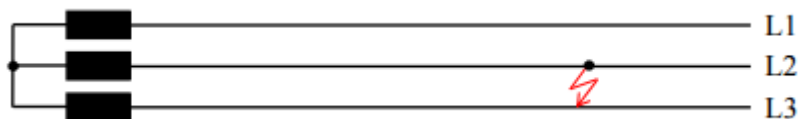
Obr. 3.2 - trojfázový zemní zkrat [4]

- Trojfázový zkrat vzniká při spojení všech tří fází a země současně v jednom místě. Je obdobou obyčejného trojfázového, ale navíc při něm dochází k propojení se zemí. Opět se jedná o souměrný zkrat, jelikož všemi vodiči protéká stejné množství proudu. [4]



## Nesouměrné zkraty

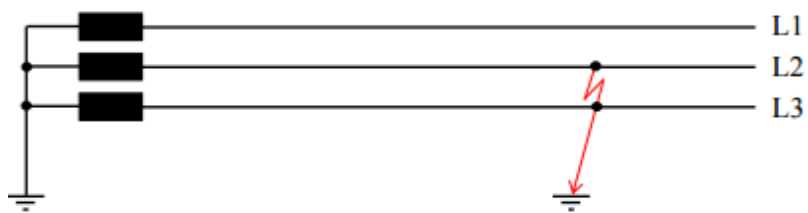
### Dvojfázový zkrat



Obr. 3.3 - dvojfázový zkrat [4]

- Dvojfázový zkrat vzniká při spojení dvou různých fází. Jedná se o nesouměrný zkrat, protože postihuje pouze dvě ze tří fází, a proto ve dvou postižených fázích protéká jiný proud než ve zbývajících třech fázích. [4]

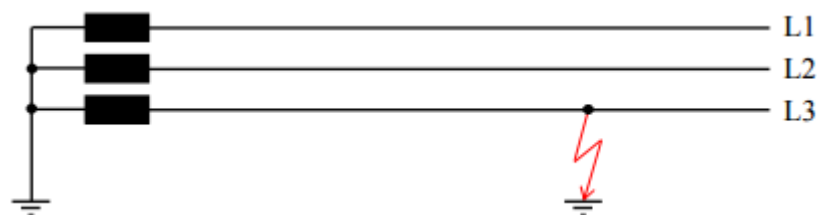
### Dvojfázový zemní zkrat



Obr. 3.4 - dvojfázový zemní zkrat [4]

- Obdobou dvojfázového s tím rozdílem, že dochází k propojení dvou fází a země. Proud soustavou protéká opět nesouměrně, proto je zařazen jako nesouměrný zkrat. [4]

### Jednofázový zkrat



Obr. 3.5 - jednofázový zkrat [4]

- Jednofázový zkrat je spojení jedné fáze a země. Jedná se o vůbec nejrozšířenější typ zkratu v elektrizační soustavě. Je to nesouměrný zkrat, jelikož v postižené fázi teče několikrát vyšší zkratový proud než ve dvou zbývajících, kde je proud jmenovitý. [4]

**Zkrat vzniká spojením dvou vodivých částí s různým potenciálem, a to buď jako:**

#### **Dokonalý zkrat**

Je spojení fází (popř. fáze a země) přes zanedbatelnou impedanci. To znamená, že spojení můžeme považovat za dokonalé (odpor spojení se zanedbává). Nejčastěji to bývá lano spadlé na zem (spojení fáze – země), spojení fází přes kovový vodící předmět nebo přímé spojení vodičů. [6]

#### **Nedokonalý zkrat**

Za nedokonalý zkrat považujeme spojení fází přes impedanci, kterou již nemůžeme zanedbávat, jelikož má velký příspěvek do výpočtu zkratových proudů. Nejčastěji v praxi to bývá spojení fází např. přes dřevo (při nepříznivých atmosférických podmínkách může v nějakém místě na vedení spadnout větev nebo celý strom a spojit dvě nebo tři fáze). [6]

#### **Obloukový zkrat**

Tento druh zkratu je velmi obtížný na výpočet. Zkrat vznikne přiblížením vodičů o různém potenciálu až na hranici, kdy je porušena izolační pevnost (nejčastěji vzduchu) a vznikne tak oblouk. Ten v čase mění svou délku a impedanci, a proto také protékající proud není konstantní. [6]

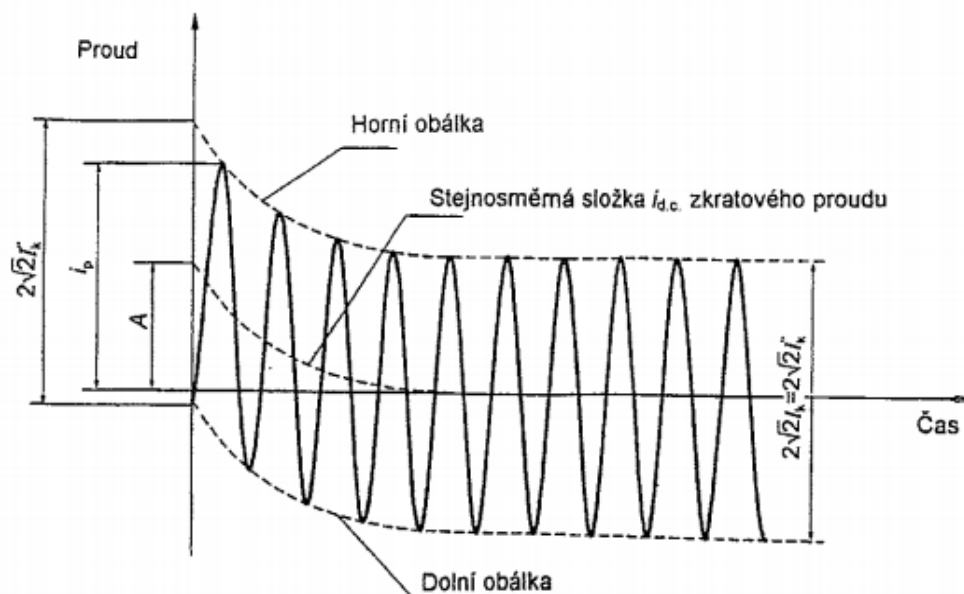
**Další dělení zkratů je rozlišení na zkrat elektrický blízký a elektrický vzdálený.**

**Zkrat elektricky vzdálený** se definuje tak, že místo, kde zkrat probíhá je dostatečně vzdáleno od synchronních generátorů, které jsou zdrojem zkratového proudu. Další podmínka je, že podíl asynchronních motorů na počátečním zkratovém proudu je menší než 5 %. Poté se efektivní hodnota zkratového proudu v čase téměř nemění a my můžeme tento zkrat přirovnat ke zkratu ideálního napětového zdroje. [5]

**Zkrat elektrický blízký** – nastane v případě, že synchronní stroj přispívá k rázovému zkratovému proudu  $I_k''$  minimálně dvojnásobkem jeho jmenovitého proudu nebo pokud příspěvek zkratového proudu asynchronních motorů není zanedbatelný (je vyšší než 5%). [5]

### 3.4 Časové průběhy zkratů

Obecné průběhy zkratových proudů podle normy ČSN EN 60909-0



Obr. 3.6 - průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu [5]

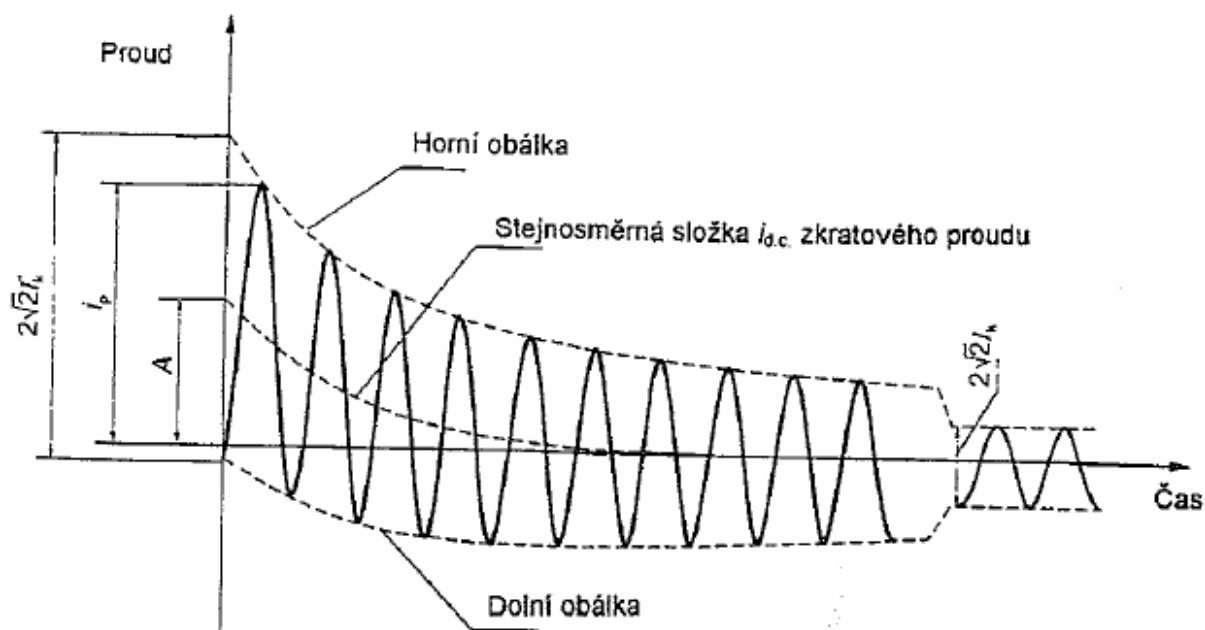
$I_k''$  – počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)

$i_p$  – nárazový zkratový proud

$I_k$  – ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$  – stejnosměrná složka zkratového proudu

$A$  – počáteční hodnota stejnosměrné složky  $i_{d.c.}$



Obr. 3.7 - průběh zkratového proudu elektricky blízkého zkratu [5]

$I_k''$  – počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)

$i_p$  – nárazový zkratový proud

$I_k$  – ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$  – stejnosměrná složka zkratového proudu

$A$  – počáteční hodnota stejnosměrné složky  $i_{d.c.}$

### 3.4.1 Simulace průběhů zkratových proudů

Program ATP Draw je technický program, ve kterém lze simulovat téměř vše, co se týče elektriky. Já ho v mém případě využil pro simulaci zkratových průběhů proudu. Pomocí jednoduchého obvodu skládajícího se ze zdroje, spínače, proudové sondy a RL zátěže je možné vytvořit ideální zkratový průběh proudu. Ukazuji zde hned několik případů, a to se stejnosměrným zdrojem, střídavým jednofázovým zdrojem, střídavým trojfázovým zdrojem (postupné spínání fází a sepnutí všech fází v čase). Tyto zkraty se berou jako ideální bez uvažování působení oblouku (např. na spínači). Dvě další simulace jsou vypínání obvodu se střídavým průběhem napětí a proudu. První je bez uvažování oblouku se zobrazeným zotaveným napětím a v druhém případě je uvažováno i s působením oblouku, který vznikne na kontaktech při vypnutí.

### Obvod se stejnosměrným zdrojem

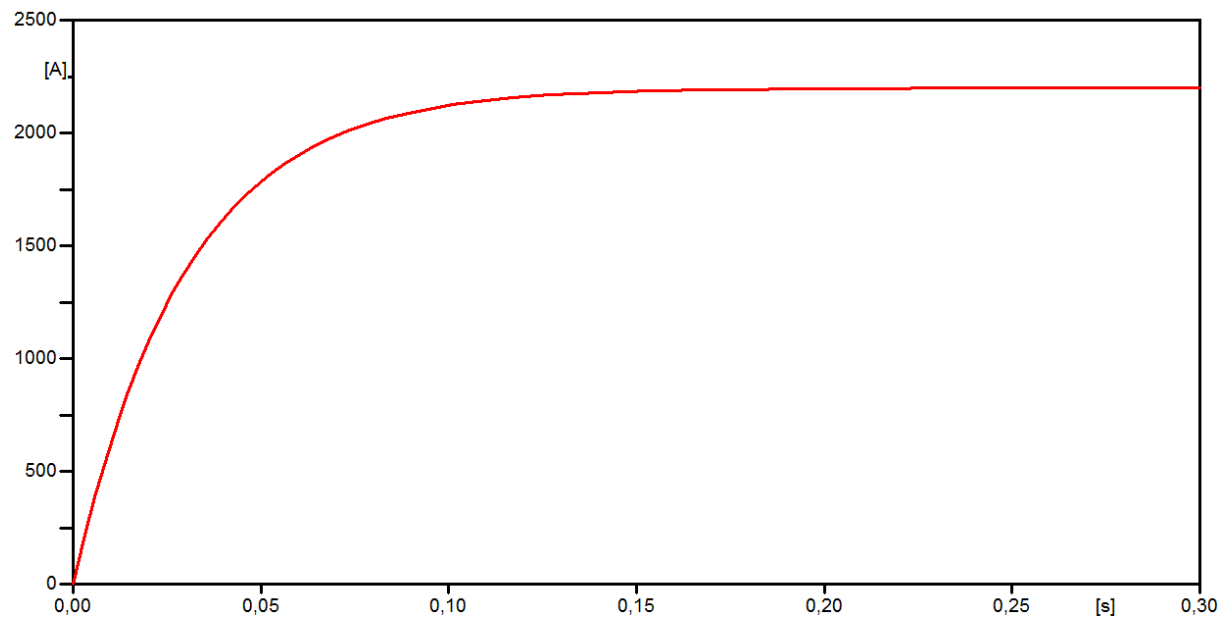
Hodnoty parametrů v obvodu:

Napětí zdroje: 22 kV

$RL$  zátěž

$R = 10 \, \Omega$

$L = 300 \, \text{mH}$



Obr. 3.8 - průběh zkratového proudu ve stejnosměrném obvodu

### Obvod se střídavým jednofázovým zdrojem

Hodnoty parametrů v obvodu:

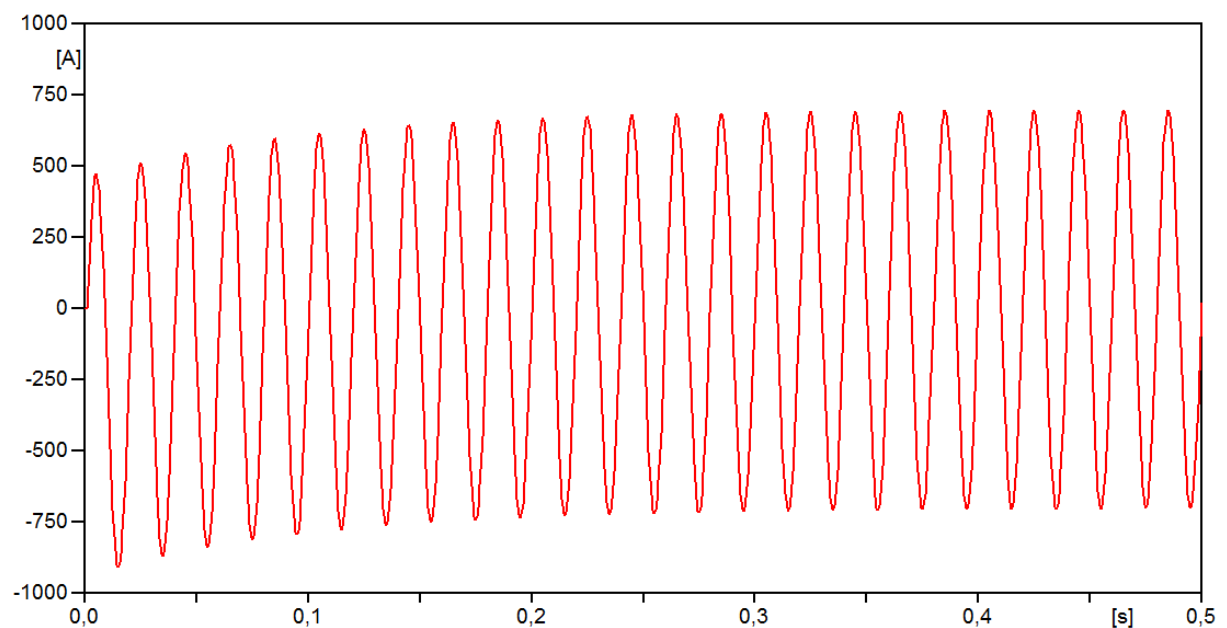
Napětí zdroje: 22 kV

$RL$  zátěž

$f = 50 \, \text{Hz}$

$R = 1 \, \Omega$

$L = 100 \, \text{mH}$



Obr. 3.9 - průběh zkratového proudu ve střídavém jednofázovém obvodu

### Obvod se střídavým trojfázovým zdrojem

Hodnoty parametrů v obvodu:

Napětí zdroje: 3x 22 kV

3x  $RL$  zátěž (zátěž je souměrná)

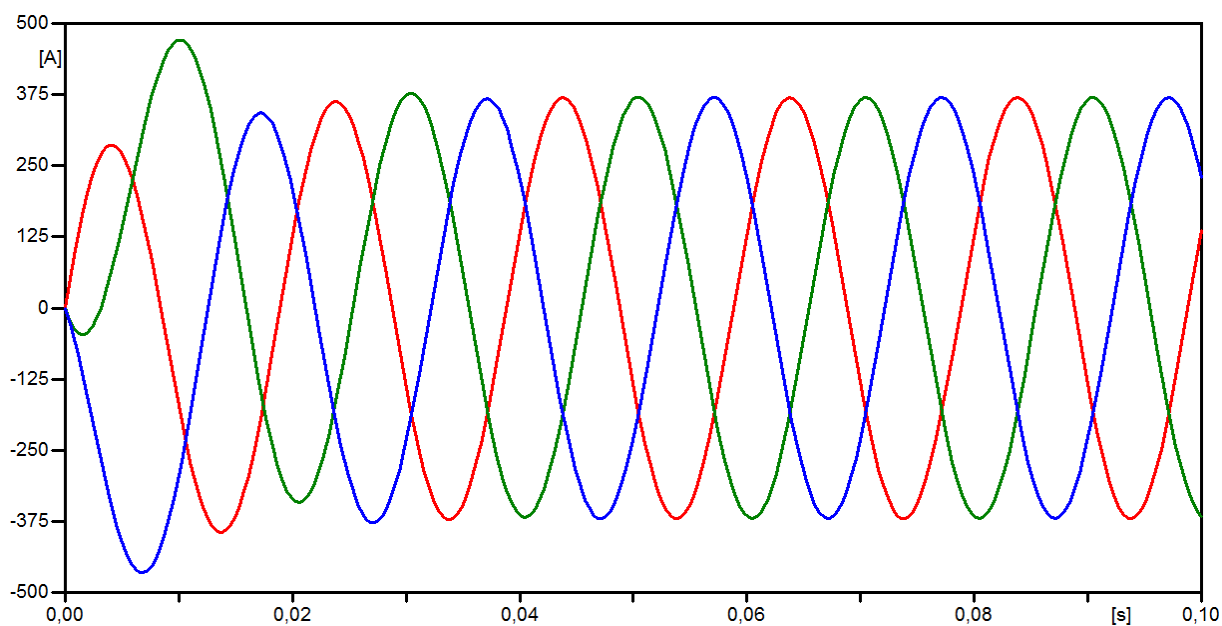
$f = 50$  Hz

$R = 10\ \Omega$

$L = 80$  mH

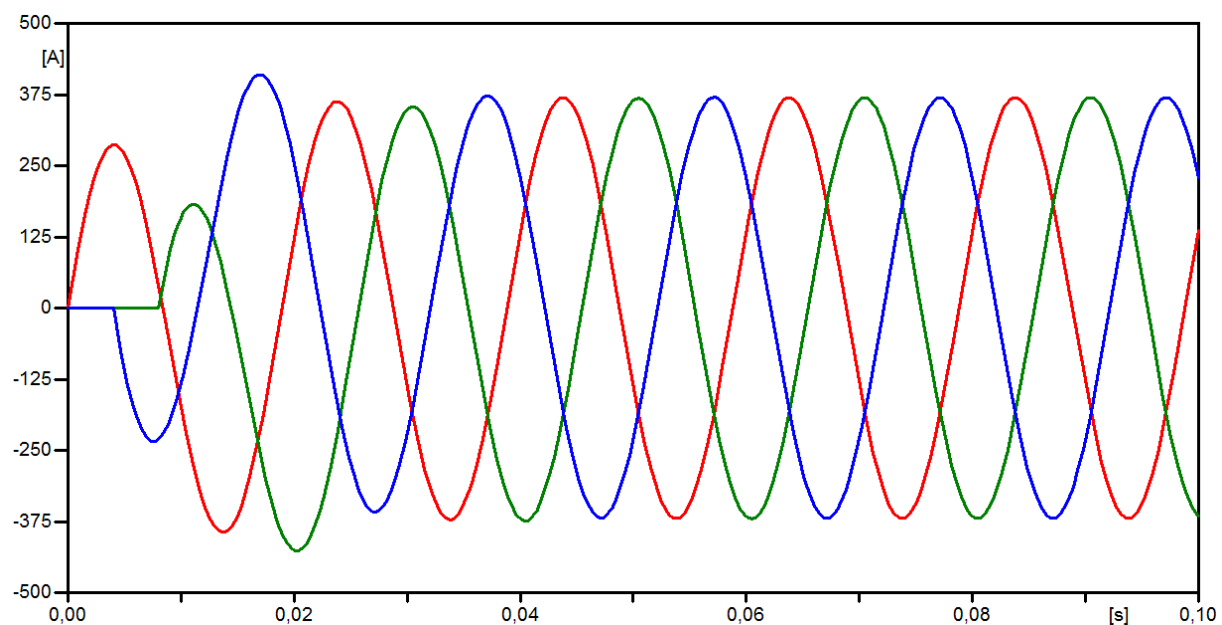
Fáze jsou vůči sobě posunuté o  $120^\circ$

a) Sepnutí ve stejný čas  $t = 0$  s



Obr. 3.10 - průběh zkratového proudu ve střídavém trojfázovém obvodu (sepnutí v čase  $t=0$ s)

b) Postupné spínání fází s  $\Delta t = 0,004$  s



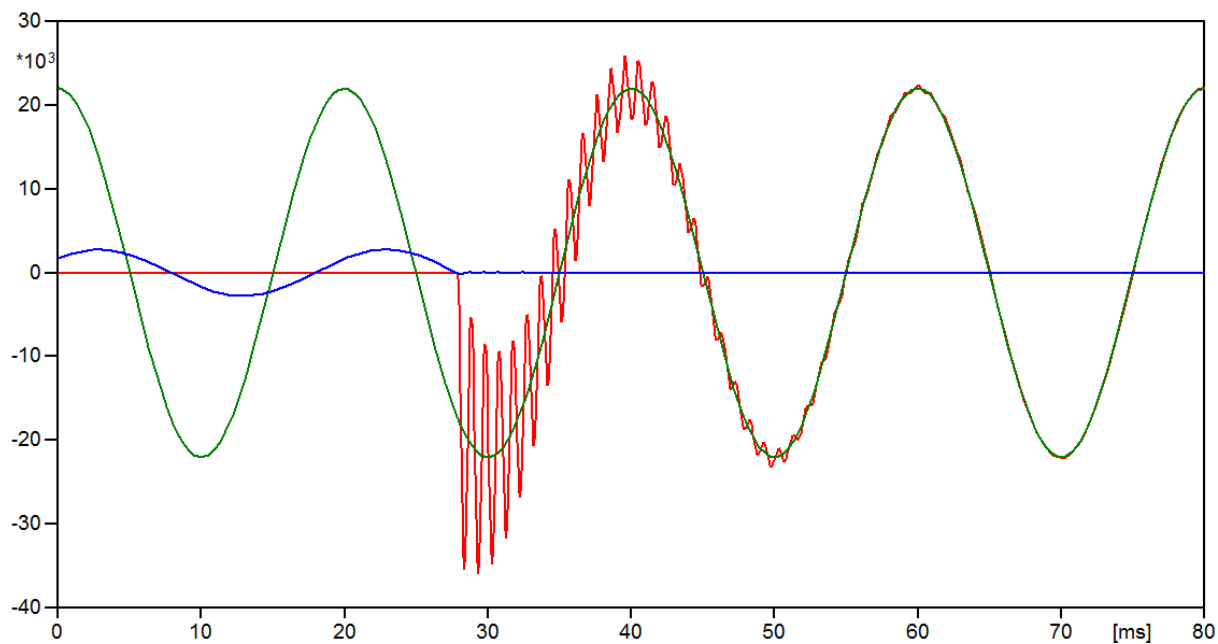
Obr. 3.11 - průběh zkratového proudu ve střídavém trojfázovém obvodu (postupné spínání)

POZN.: při porovnání obr. 3.10 a 3.11 je jasné vidět, že postupným spínáním fází do zkratu, lze docílit menších hodnot rázového zkratového proudu. Ideální stav je, když se každá fáze sepne při průchodu proudu nulou. Poté by žádná z fází neměla vyšší zkratový proud než ustálený.

### Vypínání obvodů

Napětí zdroje: 3x 22 kV,  $f = 50$  Hz

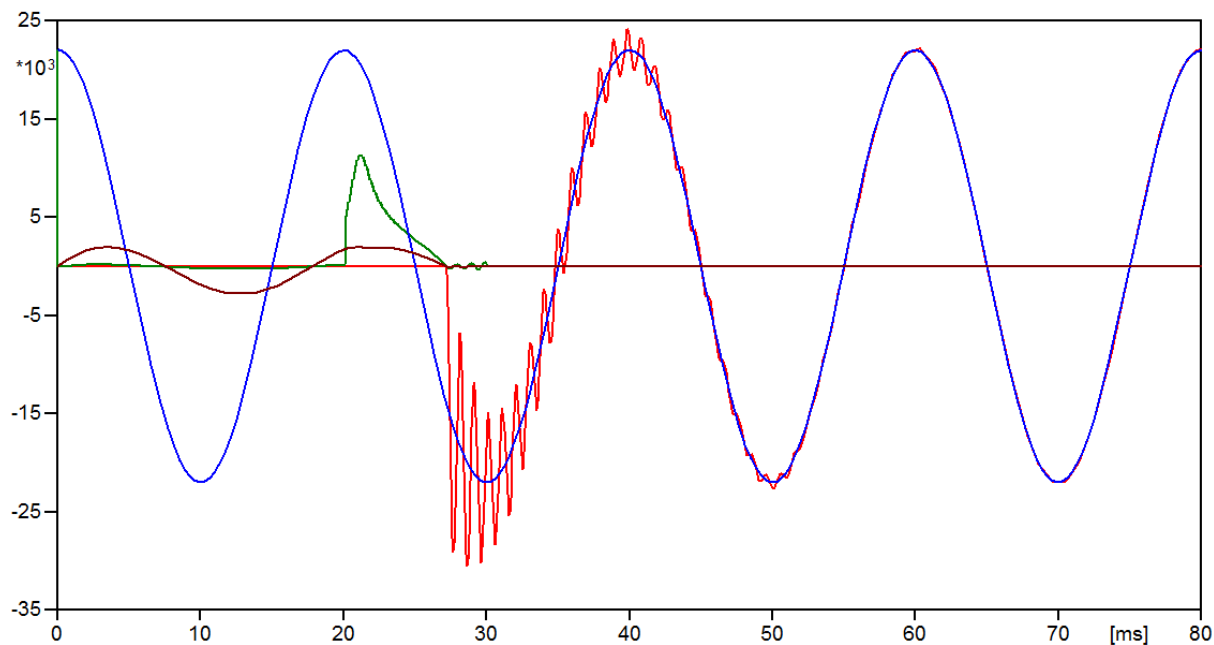
a) Bez působení oblouku



Obr. 3.12 - průběh napětí a proudu při vypínání obvodu bez uvažování oblouku

- Průběh proudu
- Průběh zotaveného napětí
- Průběh napětí zdroje

b) S působením oblouku



Obr. 3.13 - průběh napětí a proudu při vypínání obvodu s působením oblouku [8]

- Průběh napětí zdroje
- Průběh zotaveného napětí
- Průběh napětí na oblouku
- Průběh proudu

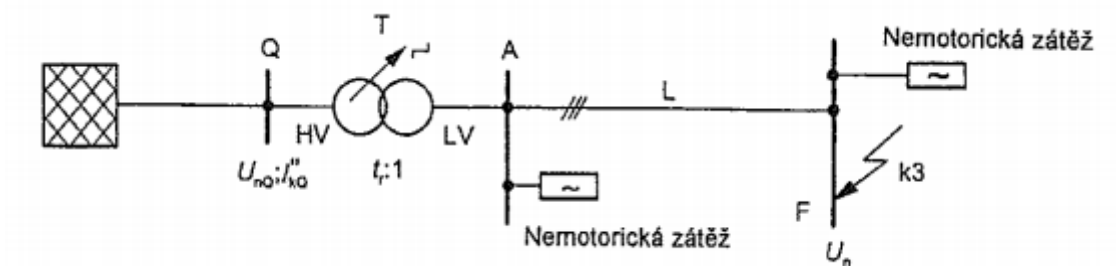
### 3.5 Metody výpočtu zkratů

Všechny počítané zkraty jsou definovány v časovém úseku od počátku zkratu až do jeho konce. Okamžité počítané hodnoty proudu se vztahují k hodnotě napětí při vzniku zkratu (na jeho počátku). [5]

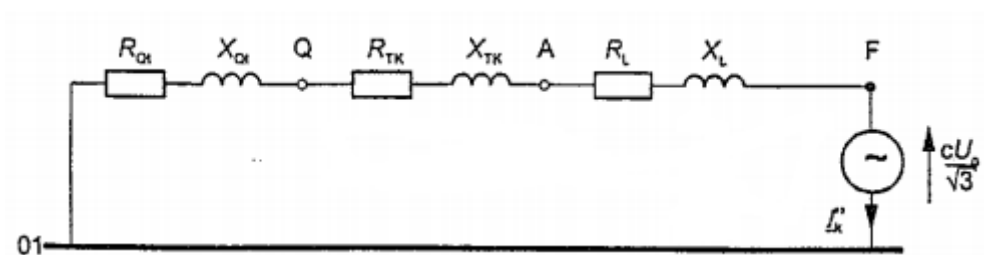
#### 3.5.1 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Jedna z metod výpočtu zkratů je založena na nahrazení místa zkratu za ekvivalentní zdroj napětí. Ten považujeme za jediný zdroj napětí v počítané soustavě, a ostatní prvky soustavy jako jsou síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje, transformátory, nahradíme pouze jejich vnitřní impedancí. [5]





Obr. 3.14 - schéma soustavy [5]



Obr. 3.15 - náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy [5]

Na obrázku 3.14 a je schéma soustavy s místem zkratu F. Tuto soustavu upravíme tak, že v místě zkratu F umístíme jediný napěťový zdroj v dané soustavě a ostatní napětí zanedbáváme (obrázek 3.15). Všechny ostatní složky soustavy přepočteme na jejich impedance, které jsou potřebné pro výpočet zkratového proudu. [5]

Při výpočtu impedancí musíme znát napěťový součinitel  $c$ . Ten lze zjistit z tabulky 1.

Tabulka 1 - napěťový činitel  $c$  [5]

| Jmenovité napětí<br>$U_n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Napěťový součinitel $c$                         |                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Maximálních zkratových proudů<br>$c_{max}^{1)}$ | Minimálních zkratových proudů<br>$c_{min}$ |
| Nízké napětí<br>100 V až 1 000 V                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,05 <sup>3)</sup><br>1,10 <sup>4)</sup>        | 0,95                                       |
| Vysoké napětí<br>>1 kV až 35 kV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1,10                                            | 1,00                                       |
| Velmi vysoké napětí <sup>2)</sup><br>>35 kV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                 |                                            |
| 1) $c_{max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí $U_m$ pro zařízení energetických soustav<br>2) Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{max}U_n = U_m$ nebo $c_{min}U_m = 0,90 \times U_m$ .<br>3) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V<br>4) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %. |                                                 |                                            |

### 3.5.2 Použití souměrných složek

Souměrné složky slouží ke zjednodušení výpočtu souměrných a nesouměrných zkratů v trojfázových soustavách. Předpokladem je symetrická struktura daného zařízení (např. transponované venkovní vedení). Svoji přesnost má i pro případ jedná-li se o netransponované venkovní vedení. [5]

Použitím této metody se zjišťují proudy v jednotlivých fázích soustavy superponováním proudů na tři souměrné složkové soustavy: [5]

- Souslední proud soustavy  $I_{(1)}$
- Zpětný proud soustavy  $I_{(2)}$
- Nulový proud (nebo také netočivý proud) soustavy  $I_{(0)}$

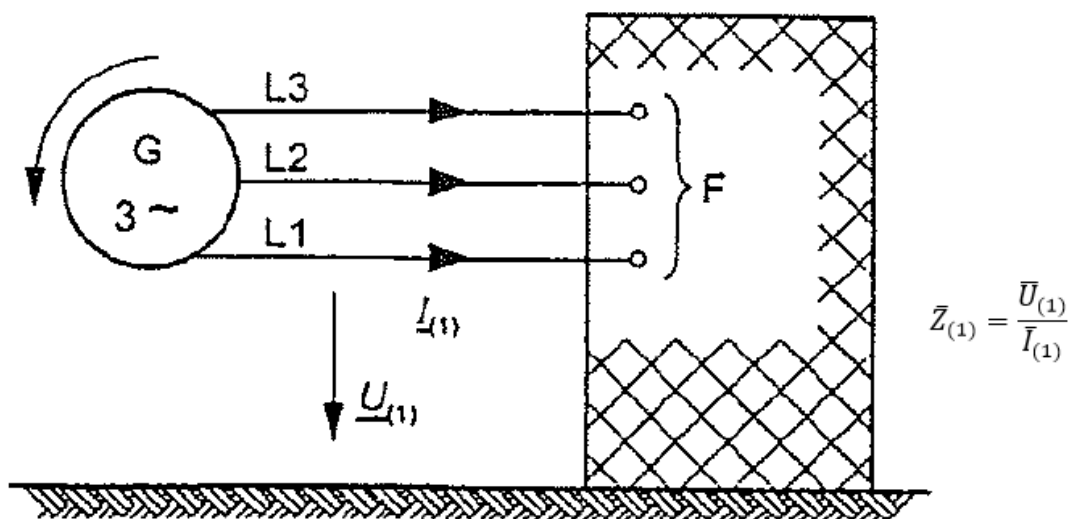
Považujeme fázi L1 za referenční, tak potom jsou proudy  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$ : [5]

$$I_{L1} = I_{(1)} + I_{(2)} + I_{(0)} \quad (3.1a)$$

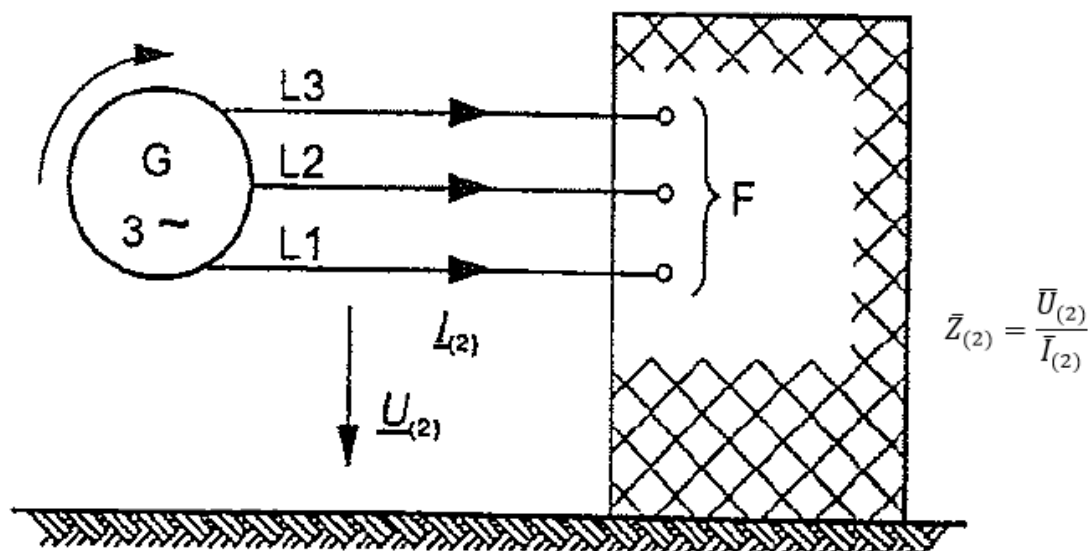
$$I_{L2} = a^2 I_{(1)} + a I_{(2)} + I_{(0)} \quad (3.1b)$$

$$I_{L3} = a I_{(1)} + a^2 I_{(2)} + I_{(0)} \quad (3.1c)$$

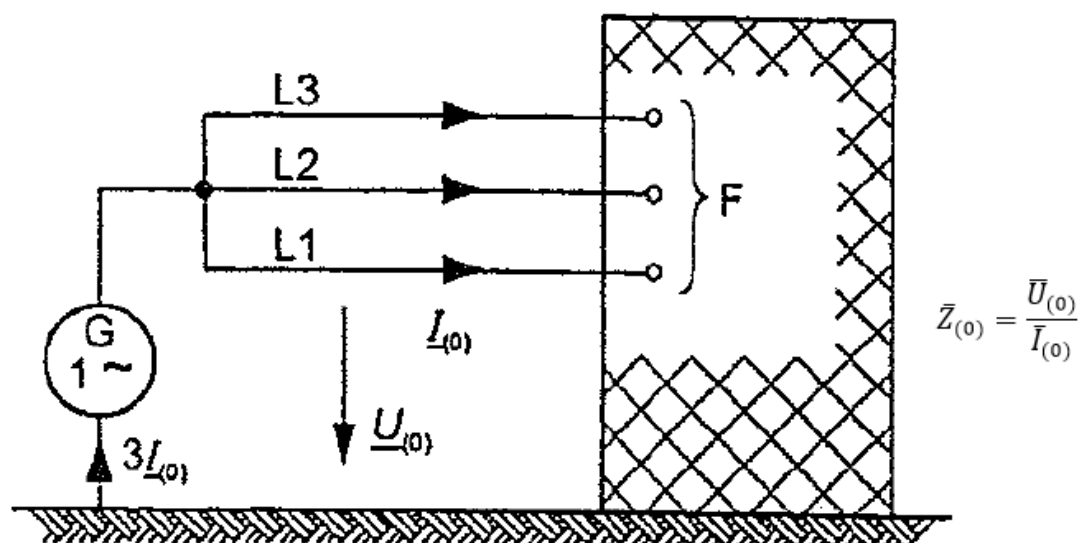
$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (3.2)$$



Obr. 3.16 - Sousledná složka zkratové impedance  $Z_{(1)}$  [5]



Obr. 3.17 - zpětná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(2)}$  [5]



Obr. 3.18 - netočivá (nulová) složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(0)}$  [5]

Souslednou zkratovou impedanci počítáme podle obr. 3.16. Všechny prvky obvodu (transformátory, vedení, kabely, synchronní/asynchronní stroje apod.) jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi. Zpětnou složku zkratové impedance počítáme podle obr. 3.17. Můžeme předpokládat, že se počítá stejně jako složka sousledná, jediný rozdíl je v teoretickém pojetí, kdy napětí v místě zkratu F přikládáme obráceně (záporně). Z toho vyplývá, že můžeme uvažovat, že  $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$  (pro vzdálené zkraty). Nulovou zkratovou impedanci počítáme podle obr. 3.18. Teoreticky přikládáme napětí mezi zkratové místo F a zemí (zemní soustavou, zemnicím lanem, stíněním nebo pláštěm kabelu apod.) [5]

### 3.5.3 Předpoklady pro výpočet

- Počítáme minimální a maximální hodnoty zkratových proudů. [5]
- Pro každý z těchto dvou typů výpočtů je daný postup. [5]

#### 1) Minimální zkratové proudy [5]

- a) použití napěťového součinitele  $c_{min}$
- b) zanedbání motorů
- c) rezistance prvků se uvažuje při nejvyšší provozní teplotě
- d) vybrat konfiguraci sítě tak, aby příspěvek z elektráren a síťových napaječů byl co nejmenší

#### 2) Maximální zkratové proudy [5]

- a) použití napěťového součinitele  $c_{max}$
- b) motory musí být zahrnuty
- c) vybrat konfiguraci sítě tak, aby příspěvek z elektráren a síťových napaječů byl co největší
- d) použití impedance pro vnější síť musí být co nejmenší, aby příspěvek zkratového proudu byl co největší
- e) rezistence prvků se uvažují při teplotě 20°C

Předpoklady pro samotný výpočet

- a) Při zkratu se nemění jeho typ. Myšleno tak, že pokud se jedná o trojfázový zkrat, musí být po celou dobu výpočtu trojfázový. To samé platí pro dvojfázový, dvojfázový zemní a jednofázový. Vždy uvažujeme pouze jeden daný typ. [5]
- b) Při zkratu neuvažujeme žádné změny ze strany sítě. To znamená, že síť považujeme za tvrdý zdroj, kde při zkratu neklesne napětí. [5]
- c) Všechny transformátory ve zkratované síti a jejich impedance uvažujeme pro přepínače, které jsou v základní poloze. Z toho důvodu, že je zaveden korekční součinitel  $K_T$  pro impedance síťových transformátorů. [5]
- d) Zanedbáváme odpor oblouku, který může vzniknout při zkratu.
- e) Zanedbáváme také všechny kapacity, paralelní admitance a netočivé statické zátěže. Výjimkou jsou pouze paralelní admitance v netočivé soustavě. [5]

Další důležitou věcí je, že v síti s rozdílnými napěťovými hladinami je nutné přepočítat hodnoty impedancí na napětí, které je v místě zkratu. Tento přepočet se určuje jako čtverec poměru napětí, ze kterého chceme impedanci přepočítat, děleno napětím, které je v místě zkratu. [5]

### 3.5.4 Postup při výpočtu zkratů

- 1) Stanovení impedance počítaného obvodu (reaktance a činné odpory) každého prvku v zadaném obvodu. [5]
- 2) Stanovení náhradního schématu, který musíme zjednodušit a stanovit výslednou impedanci zkratovaného obvodu. [5]
- 3) Samotné počítání zkratového proudu. [5]

### 3.5.5 Vzorce pro výpočet zkratových impedancí

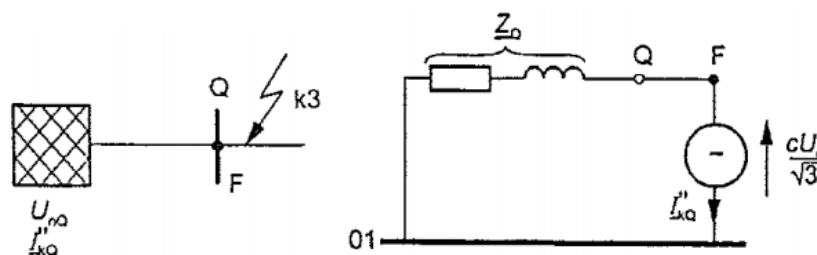
Transformátory, síťové napaječe, venkovní vedení, kabely a reaktory mají stejnou souslednou i zpětnou zkratovou impedanci. To znamená, že při výpočtu můžeme uvažovat  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$  [5]

Netočivá zkratová impedance se vypočte jako poměr napětí tří paralelních vodičů a proudu, který protéká zpětným vedením ( $Z_{(0)} = \frac{U_0}{I_0}$ ). V takovém případě protéká zpětným vodičem trojnásobek proudu netočivé složky (hodnota proudu, co protekla třemi vodiči, protéká zpět pouze jedním). U venkovního vedení to může být zemnicí lano nebo zem, u kabelu případně stínění, pancíř nebo plášť. [5]

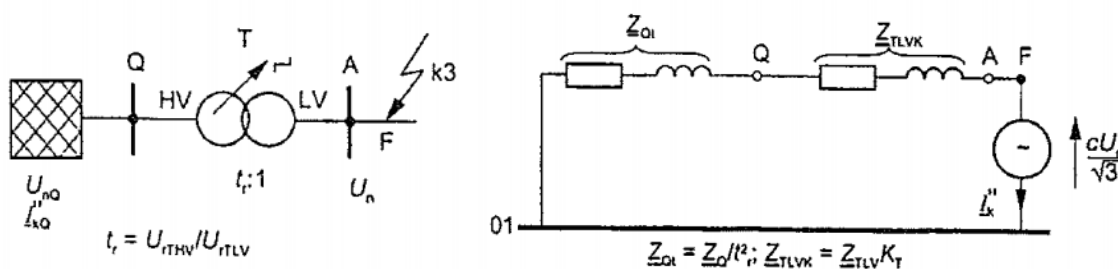
#### Síťové napaječe

Pokud je zkrat napájen ze sítě, u které znám její parametry a bod napájení, mohu vypočítat souslednou zkratovou impedanci takového napaječe jako: [5]

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (3.3)$$



Obr. 3.19 - zkrat napájen ze sítě v bodě Q bez transformátoru (+ náhradní schéma) [5]



Obr. 3.20 - zkrat napájen ze sítě v bodě Q s transformátorem (+ náhradní schéma) [5]

Je-li síť se zkratem napájena přímo z jiné sítě bez transformátoru, její zkratovou impedanci určíme podle rovnice (3.3). V tomto případě není nutné přepočítávat napěťové hladiny, výpočty jsou tedy zjednodušené. [5]

Druhým případem je síť se zkratem napájená ze sítě s rozdílnou napěťovou hladinou, než je napětí v síti se zkratem. Pokud je tedy mezi nadřazenou sítí a zkratem transformátor, musíme ho zohlednit ve výpočtu zkratové impedance. [5]

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (3.4)$$

kde:

$c$  – napěťový činitel (určíme podle tabulky 1)

$I_{kQ}''$  – počáteční souměrný rázový zkratový proud

$t_r$  – převod transformátoru

$U_{nQ}$  – jmenovité sdružené napětí v kV nahrazované sítě

### Dvouvinut'ové transformátory

Sousledná zkratová impedance  $Z_T = R_T + jX_T$  se počítá ze štítkových (jmenovitých) hodnot transformátoru. [5]

$$Z_T = \frac{u_{kr} \cdot U_{rT}^2}{100\% \cdot S_{rT}} \quad (3.5)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr} \cdot U_{rT}^2}{100\% \cdot S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (3.6)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3.7)$$

kde:

$U_{rT}$  – jmenovité napětí transformátoru (zjistitelné ze štítku)

$I_{rT}$  – jmenovitý proud transformátoru (zjistitelné ze štítku)

$S_{rT}$  – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru (zjistitelné ze štítku)

$P_{krT}$  – jmenovité ztráty nakrátko

$u_{kr}$  – jmenovité napětí nakrátko (v procentech)

$u_{Rr}$  – činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru (v procentech)

Činnou složku  $u_{Rr}$  jsme schopni spočítat ze ztrát nakrátko  $P_{krT}$  při jmenovitém proudu  $I_{rT}$ . Obě tyto hodnoty musíme uvažovat pro stejnou stranu transformátoru. [5]

Poměr odporu a reaktance transformátoru ( $R_T/X_T$ ) roste s jeho velikostí. U velkých transformátorů dokonce můžeme odpor  $R_T$  zanedbat a uvažovat, že celková impedance se rovná reaktanci. To však pouze při výpočtu zkratových proudů. Budeme-li počítat nárazový zkratový proud  $i_p$  nebo stejnosměrnou složku  $i_{d.c.}$ , tak nemůžeme činný odpor transformátoru zanedbat. [5]

Všechny potřebné informace pro výpočet jsou buď uvedeny na štítku nebo musí být změřeny. [5]

### Venkovní vedení a kabely

U vedení nebo kabelů můžeme souslednou zkratovou impedanci  $Z_L = R_L + X_L$  spočítat z parametrů daného vodiče nebo kabelu, a proto potřebujeme znát průřez a umístění (vzdálenosti vodičů navzájem). [5]

Rezistivita:

Obvykle se počítá rezistence pro 20 °C. Je-li teplota venkovního vedení vyšší, musíme použít pro výpočet vzorec, kde budeme uvažovat i vyšší teplotu. [5]

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\theta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (3.8)$$

kde

$R_{L20}$  – rezistance při 20 °C

$\theta_e$  – teplota vodiče ve °C na konci zkratu

$\alpha$  – součinitel rovný 0,004/K, platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku.

Pokud je teplota vodiče 20 °C tak se činná rezistance na jednotku délky  $R'_L$  venkovních vedení dá spočítat z rezistivity  $\rho$  a jmenovitého průřezu  $q_n$ : [5]

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (3.9)$$

Kde rezistivita  $\rho$  závisí na použitém materiálu pro daný vodič. [5]

Měď  $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$

Hliník  $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$

Slitina hliníku  $\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$

Reaktance:

Reaktanci venkovních vedení  $X'_L$  na jednotku délky lze spočítat pouze v případě, provedeme-li transpozici vedení podle vzorce: [5]

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left( \frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (3.10)$$

kde

$d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L1L3}}$  je geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo středy svazků vodičů

$r$  – poloměr jednoduchého (jednoho) vodiče. Jedná-li se o svazek vodičů, musíme vypočítat redukovaný poloměr podle vzorce  $r_e = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ , kde  $R$  je poloměr svazku.

$n$  – počet vodičů ve svazku ( $n = 1$  pro jednoduchý vodič)

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

## Reaktory

Reaktor je zařízení, které omezuje zkratové proudy, jelikož zvyšuje impedanci v síti. To znamená, že pokud nastane zkrat, je z výpočtu maximálních zkratových proudů jasné, že čím vyšší impedance, tím nižší zkratový proud bude protékat. Na druhou stranu zvyšování impedance sítě způsobuje vyšší ztráty při normálním bezporuchovém provozu. [5]

Při geometrické souměrnosti je sousledná, zpětná a netočivá zkratová impedance stejná. [5]

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\% \sqrt{3} I_{rR}} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{rR}} \quad (3.11)$$

kde

$u_{kR}$  a  $I_{rR}$  – jsou šítkové hodnoty reaktoru

$U_n$  – jmenovité napětí soustavy

## Synchronní generátory

V sítích nízkého napětí nebo v průmyslových podnicích, kde jsou generátory připojeny přímo k síti bez použití blokových transformátorů, se při výpočtu souměrných rázových zkratových proudů uvažuje sousledná impedance podle vzorce: [5]

$$Z_{GK} = K_G \cdot Z_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (3.12)$$

Kde  $K_G$  je korekční součinitel určený jako: [5]

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (3.13)$$

kde:

$c_{max}$  – napěťový činitel (určíme podle tabulky 1)

$U_n$  – jmenovité napětí soustavy

$U_{rG}$  – jmenovité napětí generátoru

$Z_{GK}$  – korigovaná impedance generátoru

$Z_G$  – rázová impedance generátoru v sousledné soustavě:  $Z_G = R_G + jX_d''$

$\varphi_{rG}$  – fázový úhel mezi  $I_{rG}$  a  $U_{rG}/\sqrt{3}$

$x_d''$  – poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci:

$$x_d'' = X_d''/Z_{rG} \text{ kde } Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$$

## Asynchronní motory

Velké asynchronní motory na vysoké napětí, ale i malé na nízké napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému proudu  $I_k''$ , k nárazovému proudu  $i_p$ , k souměrnému zkratovému vypínacímu proudu  $I_b$  a u nesouměrných zkratů také k ustálenému zkratovému proudu  $I_k$ . [5]

Příspěvek asynchronních motorů vysokého napětí musíme zahrnout do výpočtu maximálních zkratových proudů. Příspěvek motoru nízkého napětí musíme zahrnout, počítáme-li zkraty v menších sítích ocelářského a chemického průmyslu nebo přečerpávacích stanic. [5]

Výše uvedené příspěvky v nízkonapěťové síti můžeme zanedbat, pokud nepřekročí 5 % počátečního zkratového proudu  $I_{kM}''$ , který se vypočítá bez uvažování příspěvku těchto motorů. [5]



Asynchronní motory, které nejsou v době poruchy (zkratu v síti, kde jsou zapojeny) v provozu, můžeme zanedbat, jelikož nijak nepřispívají. [5]

Takže impedanci asynchronních motorů  $Z_M = R_M + jX_M$  v sousledné a zpětné složkové soustavě lze určit pomocí vzorce: [5]

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (3.14)$$

kde:

$U_{rM}$  – jmenovité napětí motoru

$I_{rM}$  – jmenovitý proud motoru

$S_{rM}$  – jmenovitý zdánlivý příkon motoru

$I_{LR}/I_{rM}$  – poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

Známe-li poměr  $R_M/X_M$ , můžeme  $X_M$  vypočítat jako:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (3.15)$$

Následující vztahy lze použít s dostatečnou přesností:

$R_M/X_M = 0,10$ , s  $X_M = 0,995 Z_M$  pro motory vysokého napětí s jmenovitým výkonem vyšším nebo rovným 1 MW;

$R_M/X_M = 0,15$ , s  $X_M = 0,989 Z_M$  pro motory vysokého napětí s jmenovitým výkonem nižším 1 MW;

$R_M/X_M = 0,42$ , s  $X_M = 0,922 Z_M$  pro motory nízkého napětí včetně připojovacích kabelů.

POZN.: Pro výpočet impedancí lze použít i druhý způsob, a to výpočet v poměrných impedancích. Vzorce se pouze mírně liší a figuruje v nich vztažný výkon, který si při výpočtu volíme. Poměrné impedance počítáme vůči zvolenému vztažnému výkonu. Při výpočtech rázových zkratových proudů nám však vyjde stejná hodnota proudu jak při použití poměrných jednotek, tak při použití fyzikálních. V poslední části této práce předkládám příklad výpočtu rázových zkratových proudů, kde demonstruji obě metody.

### 3.5.6 Počáteční rázový zkratový proud

#### Trojfázový zkrat

Počítá se z napětí ekvivalentního napěťového zdroje a zkratové impedance [5]

$$I'_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (\text{kA}) \quad (3.16)$$

### Dvojfázový zkrat

Jedná-li se o dvojfázový zkrat, tak se jeho počáteční rázový zkratový proud vypočte jako:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\bar{Z}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3} \quad (\text{kA}) \quad (3.17)$$

### Jednofázový zkrat

Při jednofázovém zkratu se počáteční rázový zkratový proud vypočte jako:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \quad (\text{kA}) \quad (3.18)$$

Obvykle trojfázový počáteční rázový zkratový proud nabývá nejvyšších hodnot. Existuje však jeden případ, kdy může jednofázový počáteční rázový zkratový proud být vyšší než trojfázový, a to když je  $\bar{Z}_{(0)}$  menší než  $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$

### 3.5.7 Nárazový zkratový proud

#### Trojfázový zkrat [5]

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (\text{kA}) \quad (3.19)$$

kde  $\kappa$  vypočteme jako:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} \quad (3.20)$$

#### Dvojfázový zkrat [5]

$$i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I''_{k2} \quad (\text{kA}) \quad (3.21)$$

Pokud je  $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$  tak je jasné, že nárazový zkratový proud dvojfázového zkratu je menší než u trojfázového, a proto ho můžeme určit jako: [5]

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \quad (\text{kA}) \quad (3.22)$$

### Jednofázový zkrat [5]

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I''_{k1} \quad (\text{kA}) \quad (3.23)$$

kde  $\kappa$  vypočteme stejně jako v 3.20

### Stejnosměrná složka zkratového proudu [5]

Stejnosměrná složka v průběhu zkratu je znázorněna na obrázcích v kapitole 3.4 (obr. 3.4 a a 3.7). Její výpočet s dostatečnou přesností můžeme realizovat podle vzorce: [5]

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi f t R/X} \quad (\text{kA}) \quad (3.24)$$

kde

$I''_k$  je počáteční souměrný rázový zkratový proud

$f$  kmitočet sítě

$t$  čas

$R/X$  je určeno jako  $\frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f}$  (kde  $f_c$  je ekvivalentní kmitočet a  $R_c$  a  $X_c$  jsou složky ekvivalentní reaktance  $\bar{Z}_c$ , při jmenovitém kmitočtu 50 Hz je obvykle  $f_c = 20 \text{ Hz}$ )

## 4 Tepelné účinky zkratů

Máme-li vodič o určitém průřezu a určité délce, kterým bude protékat proud, způsobuje tento protékající proud oteplování. Proto se pokaždé vodiče navrhují tak, aby vzhledem k množství protékaného proudu byl vodič správně dimenzován, a nedocházelo u něho k příliš velkému oteplení, které by mohlo poškodit izolaci vodiče nebo vodič samotný. Dalším důvodem, proč se navrhuje určitý průřez vodiče, je, aby nedocházelo k poklesu napětí v odběrných místech. [7]

Při zkratu však teče ve vodičích několikanásobně větší proud, a proto dochází k mnohem většímu oteplení, než je dovolené. Je to kombinace několika nelineárních jevů, takže musíme zanedbat některé z faktorů, abychom byli schopni toto oteplení matematicky vypočítat. [7]

Z toho důvodu byly přijaty tyto předpoklady: [7]

- Zanedbáváme skinefekt a proximity efekt. To znamená, že proud protékající vodičem uvažujeme tak, že teče ve všech částech vodiče rovnoměrně. Také zanedbáváme vzájemné magnetické působení jednotlivých vodičů vodorovně vedle sebe.
- Odpor vodiče je na teplotě lineárně závislý.
- Měrné teplo vodiče považujeme za konstantní.
- Ohřev vodiče posuzujeme jako děj adiabatický.

U vodičů s průřezem nad 600 mm<sup>2</sup> se skinefekt již nesmí zanedbávat. Takové případy se musí složitě matematicky spočítat. [7]

Jako další věc musíme uvažovat oteplení vodiče při opakovaných zkratech. Vezmeme-li, že jsou vodiče ve zkratu, kde dochází k rychlému opětovnému zapínání, můžeme dobu mezi jednotlivými sepnutími zanedbat, protože se vodič téměř neochladí – není na to čas. Toto spínání může probíhat několikrát za sekundu, proto zde není potřeba uvažovat ochlazování vodiče. Zapínáme-li síť v delších časových okamžicích (kde mezi jednotlivými zapnutími jsou delší časové okamžiky v řádech sekund), musíme již započítat ochlazení vodiče v dobách, kdy je vodič odpojen a má čas se chladit (obvyklá metoda chlazení vodiče je tepelné sálání popř. tepelné vedení). [7]

### 4.1 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Podle normy ČSN EN 60909-0 se ekvivalentní oteplovací zkratový proud počítá pomocí součinitele m, který je určen podle tepelného účinku stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitele n, který je určen podle tepelného účinku střídavé složky zkratového proudu. [5]

Jouleův integrál  $\int_0^{T_k} i^2 dt$  vyjadřuje energii, která se vytváří na odporovém prvku průchodem (zkratového) proudu. [5]

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (4.1)$$

Kde ekvivalentní oteplovací proud je:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (4.2)$$

Pro sérii  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) po sobě následujících trojfázových jednotlivých zkratových proudů se musí použít následující rovnice pro výpočet Jouleova integrálu nebo ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu. [5]

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I_{ki}''^2 (m_i + n_i) \cdot T_{ki} = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (4.3)$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}} \quad (4.4)$$

s dobou trvání

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki} \quad (4.5)$$

kde

$I_{ki}''$  – počáteční souměrný trojfázový rázový zkratový proud u každého zkratu

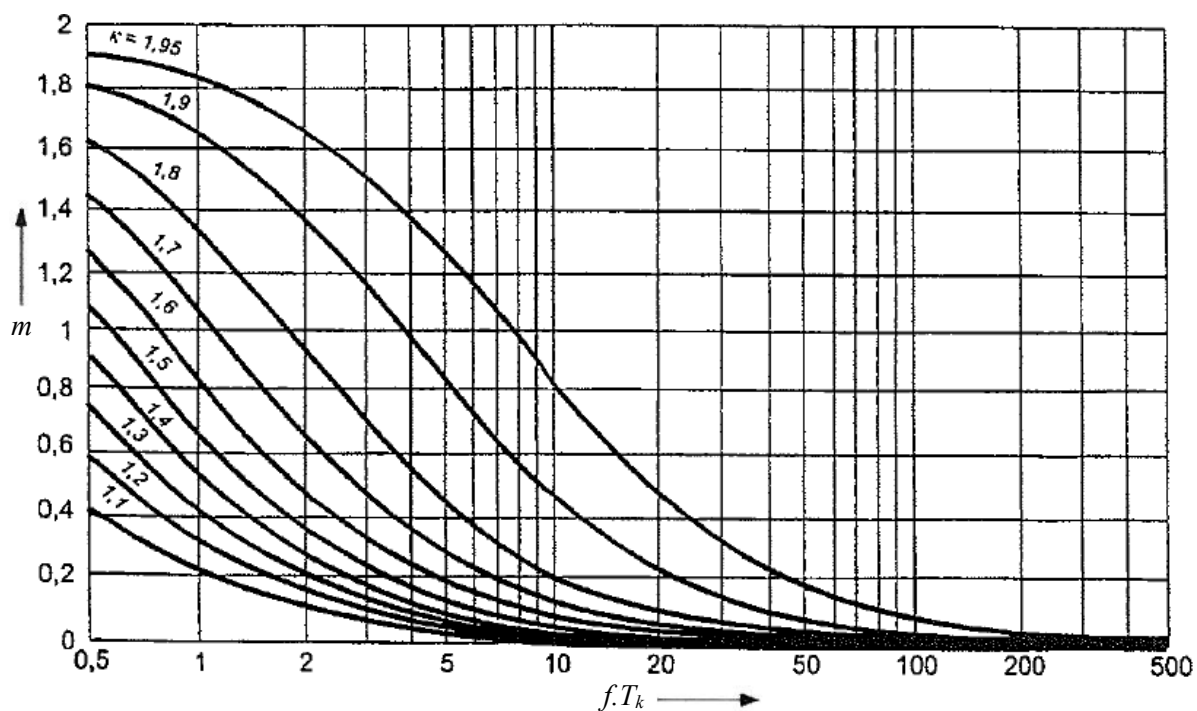
$I_{th}$  – ekvivalentní oteplovací zkratový proud

$m_i$  – součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky pro každý zkratový proud

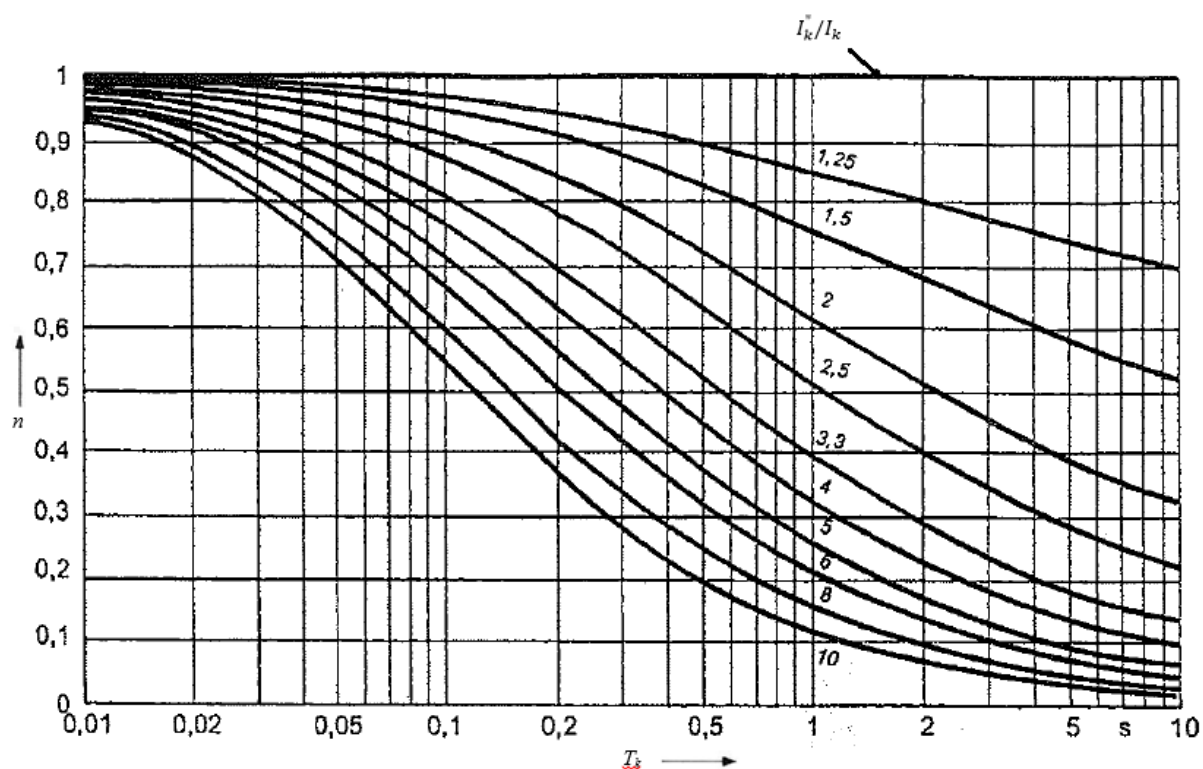
$n_i$  – součinitel pro tepelné účinky střídavé složky pro každý zkratový proud

$T_{ki}$  – doba trvání zkratového proudu u každého zkratu

$T_k$  – celková doba trvání zkratu pro všechny zkratové proudy



Obr. 4.1 - součinitel  $m$  pro zjištění tepelného účinku stejnosměrné složky zkratového proudu [5]



Obr. 4.2 - součinitel  $n$  pro zjištění tepelného účinku střídavé složky zkratového proudu [5]

## 4.2 Výpočet teplení a jmenovité hustoty krátkodobého výdržného proudu

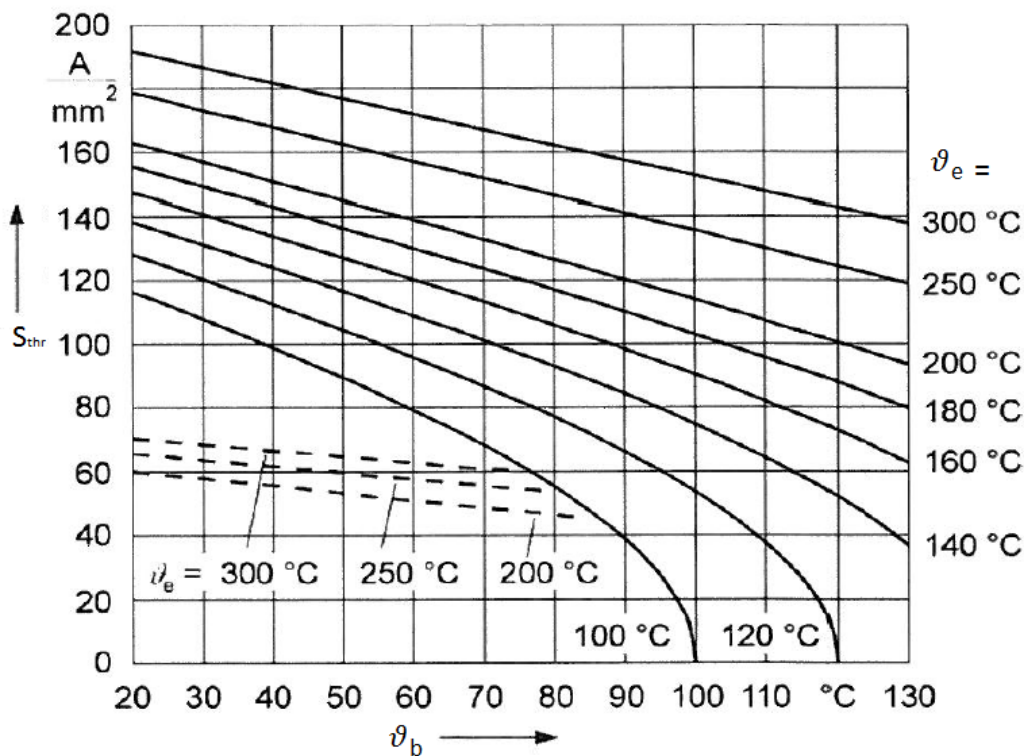
Oteplení vodiče závisí na třech aspektech. Za prvé na velikosti ekvivalentního oteplovacího proudu, poté na době trvání zkratu (čím déle zkrat trvá, tím více se vodič ohřeje) a konečně na materiálu, z něhož je vodič vyroben. [7]

V tabulce číslo 4.1 lze vidět doporučené nejvyšší teploty vodičů z různých materiálů. Překročením této teploty může dojít ke snížení mechanické pevnosti materiálu. Z praktické zkušenosti je však známo, že pevnost se sníží jen nepatrně a na schopnosti provozu to nic nezmění. Musíme však brát v potaz, jaké teploty vydrží podpěry pro tyto vodiče. [7]

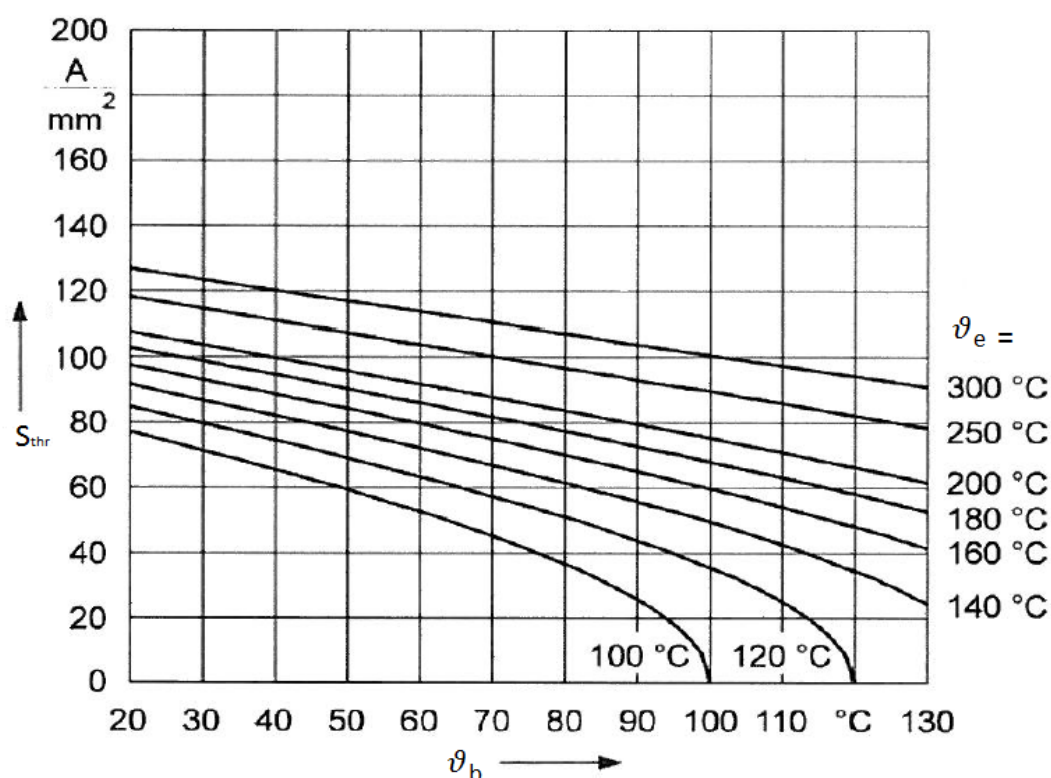
Tabulka 2 - doporučené nejvyšší provozní teploty u mechanicky namáhaných vodičů při zkratu [7]

| Typ vodiče                                            | Doporučená nejvyšší teplota vodiče při zkratu<br>°C |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Holé vodiče, plné nebo lanové: Cu, Al nebo slitina Al | 200                                                 |
| Holé vodiče, plné nebo lanové: Ocel                   | 300                                                 |

Oteplení vodiče lze určit podle obrázků 4.3 a 4.4 (podle toho, o jaký materiál vodiče se jedná) ze známé hustoty jmenovitého krátkodobého výdržného proudu nebo lze naopak vypočítat hustotu jmenovitého krátkodobého výdržného proudu z oteplení vodiče. [7]



Obr. 4.3 - plné čáry - měď; čárkované čáry - nízkolegovaná ocel [7]



Obr. 4.4 - hliník, slitina hliníku, hliníkový vodič s ocelovým jádrem (AlFe) [7]

Obr. 4.3 a 4.4 – Vztah mezi jmenovitou hustotou krátkodobého výdržného proudu ( $T_{kr} = 1$  s) a teplotou vodiče [7]

### 4.3 Výpočet krátkodobé tepelné odolnosti pro různé doby trvání zkratu

Splňuje-li hustota ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu pro všechny hodnoty  $T_k$  podmínku podle rovnice (4.6), můžeme tvrdit, že vodič má danou krátkodobou tepelnou odolnost. [7]

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (4.6)$$

Hustotu krátkodobého výdržného proudu  $S_{thr}$  lze zjistit z obr. 13 pro jmenovitou dobu trvání zkratu  $T_{kr} = 1$  s

Při výpočtu průřezů AlFe lan (hliníkových lan s nosným ocelovým jádrem) se do průřezu nezapočítává plocha ocelové části lana.

Nastane-li více po sobě jdoucích zkratů s krátkou dobou mezi zkraty, tak se celková doba zkratu určuje jako součet všech dob trvání zkratů, protože při krátké době mezi zkraty se vodič nestihne téměř vůbec ochladit, a proto můžeme tyto doby sečíst a uvažovat jako jeden zkrat. [7]

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (4.7)$$



## 5 Dynamické účinky zkratů

Každý vodič, kterým protéká nějaký proud, okolo sebe vytváří magnetické pole. Toto pole postupně snižuje svoji intenzitu s rostoucí vzdáleností od vodiče. Při provozu sítí a celkově elektrických zařízení jsou tyto síly většinou malé a zařízení jsou na ně dimenzovaná. Pokud však nastane porucha (zkrat) a vodičem teče několikanásobně větší proud, znamená to, že i tyto síly působící na ostatní vodiče jsou větší. Proto musíme rozlišovat hned několik situací, které mohou tímto nastat: [7]

- namáhání tuhých vodičů
- tahové síly v ohebných vodičích
- síly na izolátory a nosné konstrukce, které mohou být namáhány ohybem, tahem nebo tlakem
- výchylky ohebných vodičů v rozpětí

Primární (největší) síla působí na souběžné vodiče (záleží na směru proudu). Z tohoto důvodu se budu této problematice věnovat více, síly působící na vodiče s ohyby nebo křížící vodiče mohu naopak zanedbat. [7]

Obecně můžeme předpokládat, že pokud je délka vodičů o mnoho větší než jejich vzájemná vzdálenost, síly působící na vodiče se rovnoměrně rozloží po celé jejich délce a my je můžeme vyjádřit rovnicí [7]

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a_f} \quad (5.1)$$

kde

$i_1$  a  $i_2$  jsou okamžité hodnoty v proudu

$l$  je délka vodičů (neboli vzdálenost dvou upevněných konců)

$a_f$  je osová vzdálenost mezi vodiči

To, zda se vodiče přitahují nebo odpuzují, určuje směr proudu. Pokud má proud protékající dvěma vodiči stejný směr, vodiče se přitahují. Naopak pokud je v každém vodiči směr jiný (tzn. v jednom vodiči teče jedním směrem a v druhém vodiči teče směrem opačným), jsou síly působící na vodiče odpudivé. [7]

### 5.1 Tuhé vodiče – elektromagnetické síly a výpočty

Tuhými vodiči se rozumí neohebné druhy vodičů používaných v energetice jako např. přípojnice. Ty mají obvykle obdélníkový průřez. Mají také různé druhy podpěr, a to buď pevné, prosté nebo kombinace těchto dvou způsobů. [7]

V případě tuhých vodičů si musíme dát pozor na mechanické kmitání vodičů a kmitočet dané sítě. Pokud by se dostalo toto vzájemné kmitání do rezonance, síly by se mohly dokonce navýšit. [7]

### 5.1.1 Trojfázový zkrat – výpočet vrcholové síly mezi hlavními vodiči

Výpočet je uvažován pro rozložení vodičů v jedné rovině vedle sebe. Nejvyšší působící síla je vyvíjena na střední hlavní vodič a je určena jako: [7]

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (5.2)$$

kde

$i_p$  je vrcholová hodnota zkratového proudu při souměrném zkratu – výpočet viz kapitola 3

$l$  je délka vodičů (neboli vzdálenost dvou upevněných konců)

$a_m$  účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči

Tuto rovnici lze použít pro výpočet síly, pokud jsou vodiče s kruhovým průřezem uspořádány v rovnostranném trojúhelníku o délce strany  $a_m$ . [7]

### 5.1.2 Dvojfázový zkrat – výpočet vrcholové síly mezi dvěma hlavními vodiči

Výpočet vrcholové síly pro zkrat mezi dvěma hlavními vodiči (dvojfázový zkrat) v trojfázové soustavě nebo zkrat ve dvojvodičové jednofázové soustavě je určen jako: [7]

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (5.3)$$

kde

$i_{p2}$  je vrcholová hodnota zkratového proudu při zkratu mezi dvěma vodiči

$l$  je délka vodičů (neboli vzdálenost dvou upevněných konců)

$a_m$  účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči

### 5.1.3 Výpočet vrcholové síly mezi hlavními a souběžnými dílčími vodiči

Největší působící síla je mezi vnějšími dílčími vodiči a také mezi dvěma sousedícími spojovacími díly a je určena jako: [7]

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (5.4)$$

kde

$n$  je počet dílčích vodičů

$i_p$  je  $i_{p1}$  pro trojfázovou soustavu nebo  $i_{p2}$  pro dvojvodičovou jednofázovou soustavu

$l_s$  je maximální vzdálenost mezi dvěma sousedícími spojovacími díly

$a_s$  účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči

#### 5.1.4 Výpočet účinné vzdálenosti mezi hlavními vodiči a mezi dílčími vodiči

Síly působící na vodiče, které vedou zkratový proud, jsou různé. Zaleží na geometrickém uspořádání (jestli jsou vodiče v jedné rovině, v rovnostranném trojúhelníku, popř. jinak) a také na tvaru průřezů samotných vodičů. Proto je v předchozích vzorcích uveden parametr účinná vzdálenost (v případě 5.1.1 a 5.1.2 je to účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči a v případě 5.1.3 je to účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči). [7]

Účinná vzdálenost  $a_m$  mezi hlavními vodiči, které jsou od sebe vzdáleny délkou  $a$  se určí jako: [7]

- hlavní vodiče, kde jeden má kruhový průřez

$$a_m = a \quad (5.5)$$

- hlavní vodiče, kde jeden má obdélníkový průřez nebo hlavní vodiče složené z dílčích vodičů s obdélníkovými průřezy [7]

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (5.6)$$

kde

$k_{12}$  se určí z Obr. 5.1 pro  $a_{1s} = a, b_s = b_m, c_s = c_m$

Účinná vzdálenost  $a_s$  mezi  $n$  souběžně jdoucími vodiči hlavního vodiče: [7]

- dílčí vodiče s kruhovým průřezem

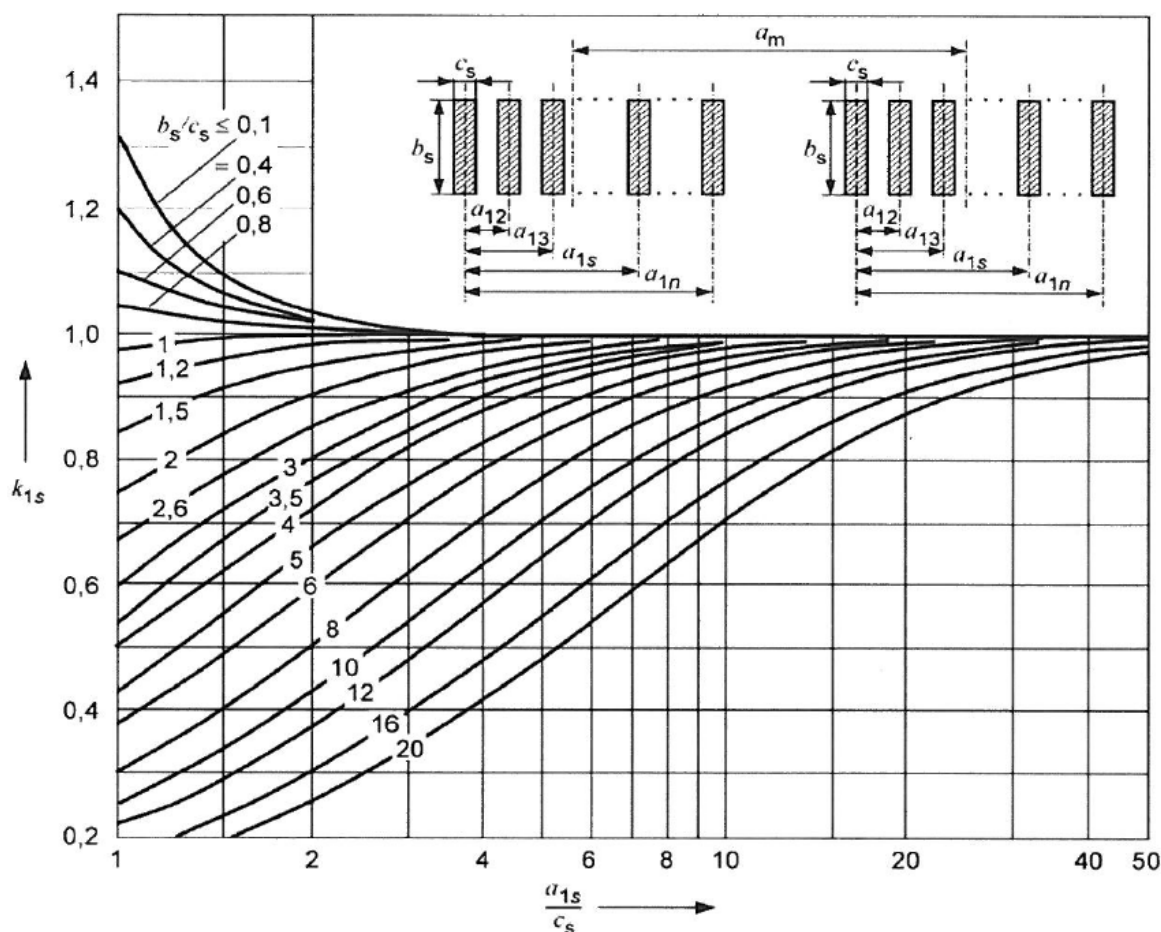
$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (5.7)$$

- dílčí vodiče s obdélníkovým průřezem

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (5.7)$$

kde

$k_{12}, \dots, k_{1n}$  se určí z Obr. 5.1



Obr. 5.1 - součinitel  $k_{1n}$  pro zjištění účinné vzdálenosti vodiče [7]

## 5.2 Ohebné vodiče

Kvůli tomu, že jsou tyto vodiče ohebné, tak při jejich vodorovném zavěšení nastává průhyb mezi uchycením (stožáry) – takzvaná klesačka. V této kapitole je nutné brát v úvahu hned několik možných variant. Nejprve rozdělím síly podle toho, kdy, a na co působí. První případ je, kdy síla na vodič působí v době zkratu a dojde tak k vychýlení z jeho klidové polohy. Po odeznění zkratu – vybavení ochrany nebo vypnutí sítě dojde k poklesu vodiče. Je důležité rozlišovat, zda se jedná o svazkové vodiče, kde musíme uvažovat kontrakční účinky síly mezi vodiči. [7]

V první části této kapitoly, v podkapitole 5.2.1 se budu věnovat hlavním vodorovným vodičům. V další části 5.2.3 to budou hlavní vodiče svislé. [7]

V elektrických instalacích s ohebnými vodiči se uvažuje, že při zkratu dvou vodičů jsou síly téměř stejné jako při souměrném trojfázovém zkratu. Jediný rozdíl je, že při zkratu dvou fází (dvou vodičů) se tyto vodiče přitahují více, než při zkratu souměrném trojfázovém (při tom se síly naopak rozdělí rovnoměrně mezi všechny tři vodiče a působící síly jsou menší). [7]

### 5.2.1 Vodorovné hlavní vodiče

V této části budu uvažovat vodorovné ohebné vodiče s klesačkami i bez nich. Nesmíme také zapomenout vypočítat namáhání způsobená dílčími vodiči. Tyto výpočty uvažujeme pro jednotlivé vodiče a také pro svazky vodičů. [7]

Podmínka pro uvažování vodičů jako vodorovných, je, že rozdíl výšky podpěrných bodů nesmí přesahovat 25 % vzdálenosti podpěrných bodů. Těmito výpočty se obvykle určují síly do rozpětí podpěrných bodů 120 m a průhybu vodičů 8 %. Pokud bude vzdálenost nebo průhyb větší, může být silové namáhání vodičů menší než pro 120 m a 8 % průhyb. [7]

Elektromagnetická síla působící na jednotku délky hlavního ohebného vodiče v trojfázové soustavě se určí jako: [7]

Pokud prochází proud po celé délce vodiče s klesačkou nebo bez klesačky:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2 l_c}{a l} \quad (5.8)$$

Pokud prochází proud polovinou délky vodiče a klesačkou:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2 \frac{l_c}{2} + \frac{l_v}{2}}{a l} \quad (5.9)$$

kde

$I_k''$  je počáteční souměrný rázový zkratový proud v trojfázové soustavě

$a$  osová vzdálenost hlavních vodičů

$l_c$  délka lana hlavního vodiče

$l_v$  délka lana klesačky

Pro vodiče, které jsou volně zavěšené a působí ohybovými silami na podpěrné izolátory, je  $l_c = l$ . Naopak pro rozpětí s předpjatými vodiči platí  $l_c = l - 2l_1$ , kde  $l_1$  bereme jako délku jednoho izolátorového řetězce. [7]

Pro jednofázové dvouvodičové soustavy můžeme použít stejný vzorec, pouze proud  $0,75 (I_k'')^2$  musíme nahradit za  $(I_{k2}'')^2$ . [7]

Důležitým aspektem tomto tématu je poměr vyvolané elektromagnetické síly zkratovým proudem a síly gravitační, která působí na vodič samotný a je dána vztahem: [7]

$$r_g = \frac{F'}{n m'_s g} \quad (5.10)$$

a směr výsledné působící síly: [7]

$$\delta_1 = \arctan(r) \quad (5.11)$$

Ekvivalentní statický průhyb ve středu vodiče je určen jako: [7]

$$f_{es} = \frac{n m'_s g l^2}{8 F_{st}} \quad (5.12)$$

Perioda kmitání vodiče je určena jako: [7]

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (5.13)$$

- to platí pouze pro malé úhly vychýlení a bez průchodu proudu

Perioda kmitání při průchodu zkratového proudu je určena jako: [7]

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} (\delta_1^{90^\circ})^2 \right]} \quad (5.14)$$

kde  $\delta_1$  se dosazuje ve stupních

Úroveň tuhosti je určena jako: [7]

$$N = \frac{1}{S l} + \frac{1}{n E_{eff} A_s} \quad (5.15)$$

kde S je výsledná pérová konstanta obou upevňovacích bodů. [7]

Pokud neznáme přesnou hodnotu S, je možné pro volně zavěšené vodiče působící ohybovou silou na izolátory uvažovat  $S = 100 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ . [7]

Pokud neznáme přesnou hodnotu S, lze pro rozpětí s předpjatými vodiči použít jednu z následujících možností pro různé hladiny napětí. [7]

- $150 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  až  $1300 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  pro jmenovité napětí 123 kV
- $400 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  až  $2000 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  pro jmenovité napětí 245 kV
- $600 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  až  $3000 \cdot 10^3 \text{ N/m}$  pro jmenovité napětí 420 kV

Skutečný modul pružnosti [7]

$$E_{eff} = \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st}}{n A_s \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{pro } \frac{F_{st}}{n A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{pro } \frac{F_{st}}{n A_s} \geq \sigma_{fin} \end{cases} \quad (5.16)$$

kde  $\sigma_{fin} = 50 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

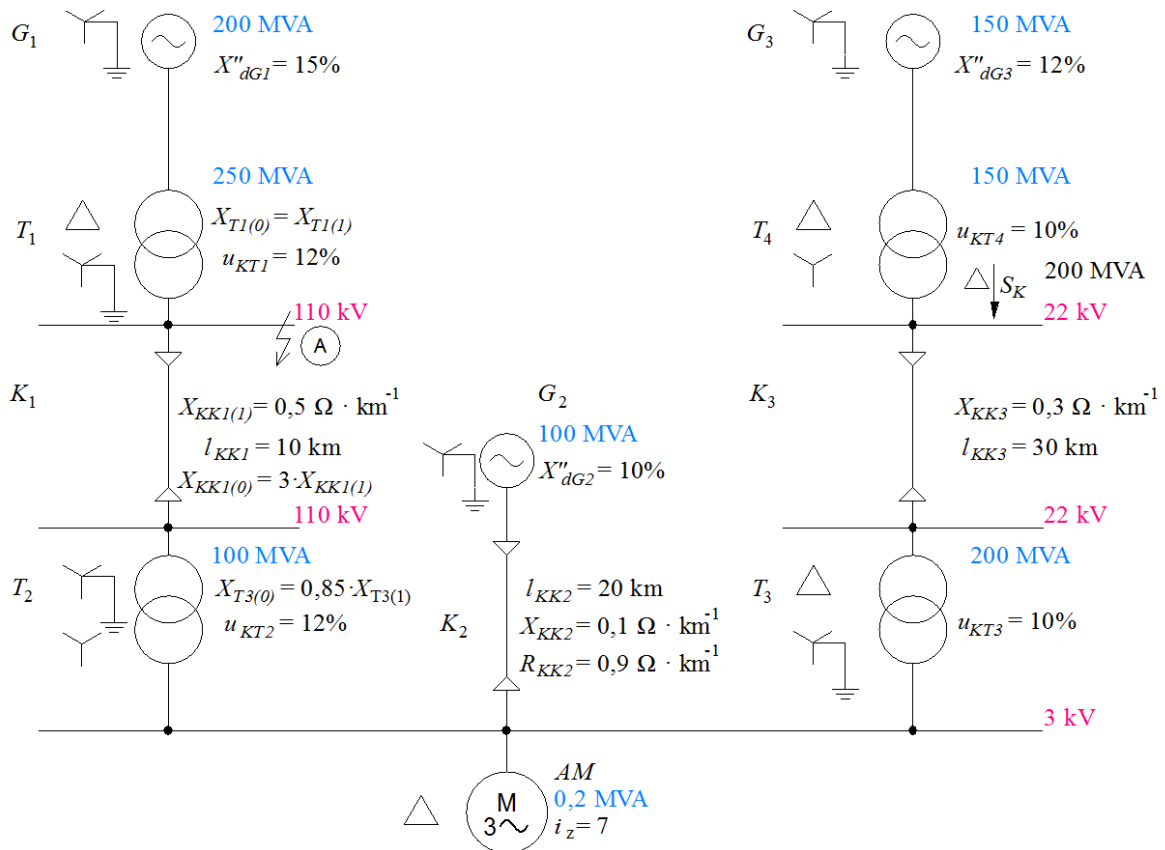
## 6 Výpočet zkratů zadané sítě

### Zadání:

Vypočítejte rázové zkratové proudy pro zadanou část sítě. Určete jednofázový, dvojfázový a trojfázový rázový zkratový proud v místě zkratu A.

Výpočty impedancí a proudů proveďte pomocí fyzikálních jednotek i poměrných.

### Schéma sítě:



Obr. 6.1 - schéma zadané sítě

### Zvolené parametry prvků v síti:

#### Soustava

$$S_k = 200 \text{ MVA}$$

#### Transformátory

$$S_{T1} = 250 \text{ MVA} \quad u_{kT1} = 12\%$$

$$S_{T2} = 100 \text{ MVA} \quad u_{kT2} = 12\% \quad P_{KT2} = 50 \text{ MW}$$

$$S_{T3} = 200 \text{ MVA} \quad u_{kT3} = 10\% \quad P_{KT3} = 150 \text{ MW}$$

$$S_{T4} = 150 \text{ MVA} \quad u_{kT4} = 10\%$$

#### Kabely

$$X_{KK1} = 0,5 \Omega \cdot \text{km}^{-1}; l_{k1} = 10 \text{ km}$$

$$X_{KK1(0)} = 3 \cdot X_{kk1(1)}$$

$$X_{KK2} = 0,1 \Omega \cdot \text{km}^{-1}; l_{k2} = 20 \text{ km}$$

$$R_{KK2} = 0,9 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$



$$X_{KK3} = 0,3 \, \Omega \cdot km^{-1}; l_{k3} = 30 \, km$$

### Generátory

$$S_{G1(1)} = 200 \, MVA \quad u''_{dG1} = 15\%$$

$$S_{G2(1)} = 100 \, MVA \quad u''_{dG2} = 10\%$$

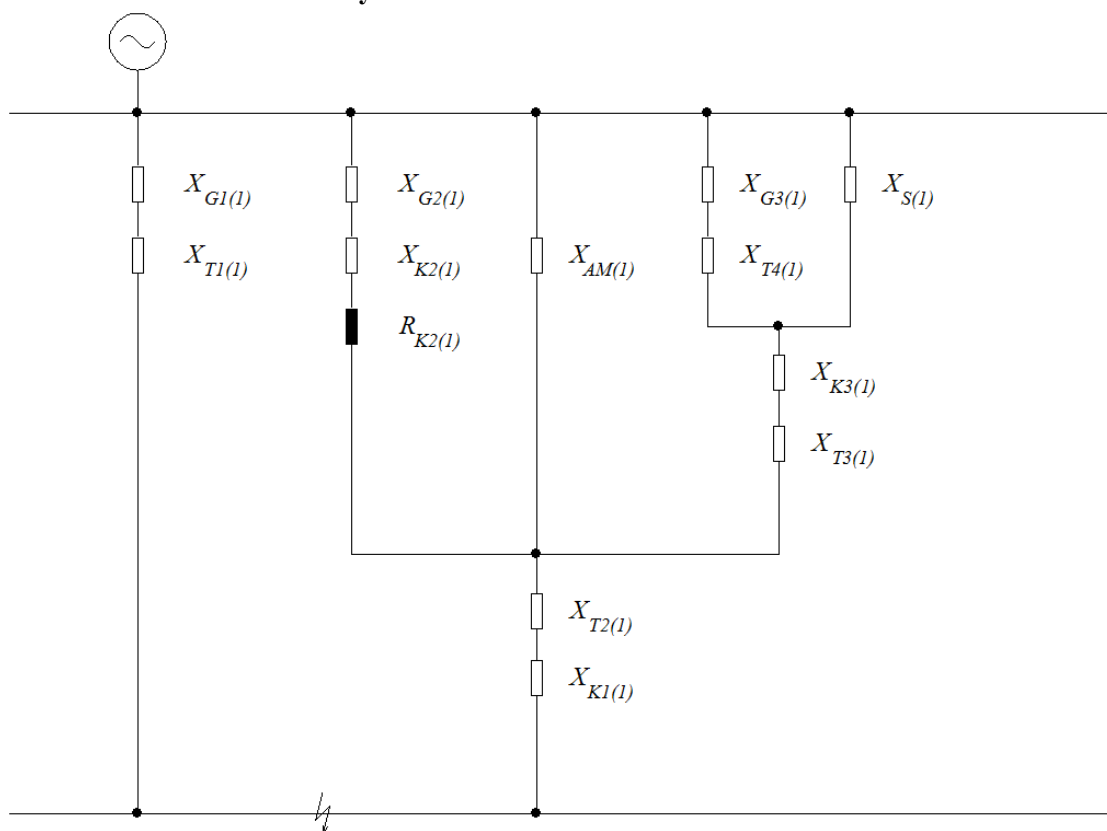
$$S_{G3(1)} = 150 \, MVA \quad u''_{dG3} = 12\%$$

### Asynchronní motor

$$S_{AM} = 0,2 \, MVA$$

$$i_z = 7$$

### Náhradní schéma sousledné složky



Obr. 6.2 - náhradní schéma zadané sítě (sousledná složka)

### Výpočet impedancí ve fyzikálních jednotkách:

$$\text{Napětí zkratu: } U_k = 110 \, kV$$

Převod na napěťovou hladinu zkratu se vypočte jako:

$$\left( \frac{U_k}{U_N} \right)^2$$

**Soustava:**

$$X_{s(1)} = \frac{c \cdot U_N^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 22^2}{200} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 66,55 \, \Omega$$

**Transformátory:**

$$X_{T1(1)} = \frac{u_{kT1}}{100} \cdot \frac{U_{NT1}^2}{S_{T1}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{250} = 5,808 \, \Omega$$

$$X_{T2(1)} = \frac{u_{kT2}}{100} \cdot \frac{U_{NT2}^2}{S_{T2}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{110^2}{100} = 14,52 \, \Omega$$

$$X_{T3(1)} = \frac{u_{kT3}}{100} \cdot \frac{U_{NT3}^2}{S_{T3}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{3^2}{200} \cdot \left(\frac{110}{3}\right)^2 = 6,05 \, \Omega$$

$$X_{T4(1)} = \frac{u_{kT4}}{100} \cdot \frac{U_{NT4}^2}{S_{T4}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{22^2}{150} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 8,07 \, \Omega$$

**Kabely:**

$$X_{K1(1)} = X_{KK1} \cdot l_{KK1} = 0,5 \cdot 10 = 5 \, \Omega$$

$$X_{K2(1)} = X_{KK2} \cdot l_{KK2} \cdot \left(\frac{U_k}{U_N}\right)^2 = 0,1 \cdot 20 \cdot \left(\frac{110}{3}\right)^2 = 2\,688,89 \, \Omega$$

$$R_{K2(1)} = R_{KK2} \cdot l_{KK2} \cdot \left(\frac{U_k}{U_N}\right)^2 = 0,9 \cdot 20 \cdot \left(\frac{110}{3}\right)^2 = 24\,200 \, \Omega$$

$$X_{K3(1)} = X_{KK3} \cdot l_{k3} \cdot \left(\frac{U_k}{U_N}\right)^2 = 0,3 \cdot 30 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 225 \, \Omega$$

**Generátor (alternátor)**

$$X_{G1(1)} = \frac{x_{dG1} \cdot U_{NG1}^2}{100 \cdot S_{G1}} = \frac{15 \cdot 110^2}{100 \cdot 200} = 9,075 \, \Omega$$

$$X_{G2(1)} = \frac{x_{dG2} \cdot U_{NG2}^2}{100 \cdot S_{G2}} \cdot \left(\frac{U_k}{U_{NG2}}\right)^2 = \frac{10 \cdot 3^2}{100 \cdot 100} \cdot \left(\frac{110}{3}\right)^2 = 12,1 \, \Omega$$

$$X_{G3(1)} = \frac{x_{dG3} \cdot U_{NG3}^2}{100 \cdot S_{G3}} \cdot \left(\frac{U_k}{U_{NG3}}\right)^2 = \frac{12 \cdot 22^2}{100 \cdot 150} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 9,68 \, \Omega$$

**Asynchronní motor**

$$X_{AM(1)} = \frac{U_{AM}^2}{i_z \cdot S_{AM}} = \frac{3^2}{7,0,2} = 8642,86 \, \Omega$$

**Impedance jako komplexní čísla**

$$\bar{Z}_{s(1)} = 0 + j66,55 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{T1(1)} = 0 + j5,808 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{T2(1)} = 0 + j14,52 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{T3(1)} = 0 + j6,05 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{T4(1)} = 0 + j8,07 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{K1(1)} = 0 + j5 \, \Omega$$

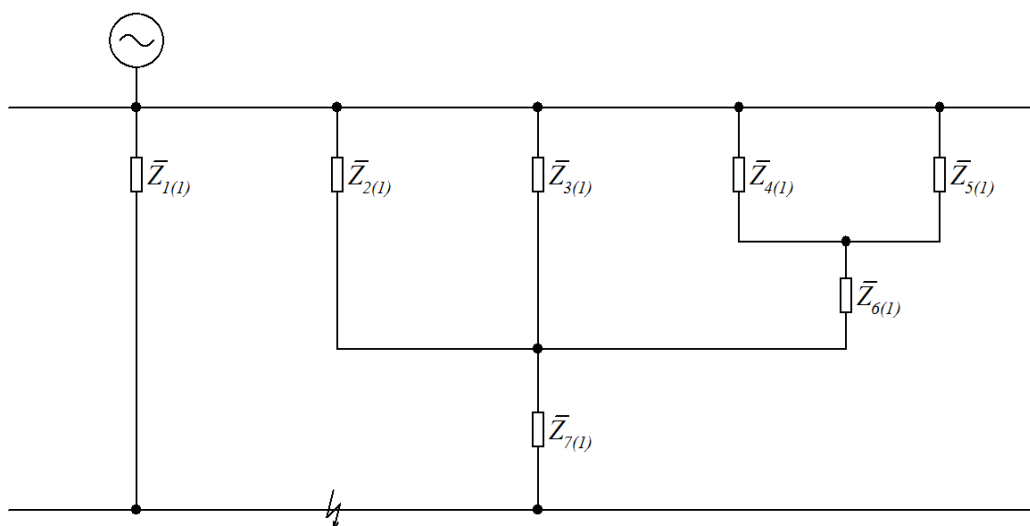
$$\bar{Z}_{K2(1)} = 24\,200 + j2\,688,89 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{K3(1)} = 0 + j225 \, \Omega$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{G1(1)} &= 0 + j9,075 \, \Omega \\ \bar{Z}_{G2(1)} &= 0 + j12,1 \, \Omega \\ \bar{Z}_{G3(1)} &= 0 + j9,68 \, \Omega \\ \bar{Z}_{AM(1)} &= 0 + j8642,86 \, \Omega\end{aligned}$$

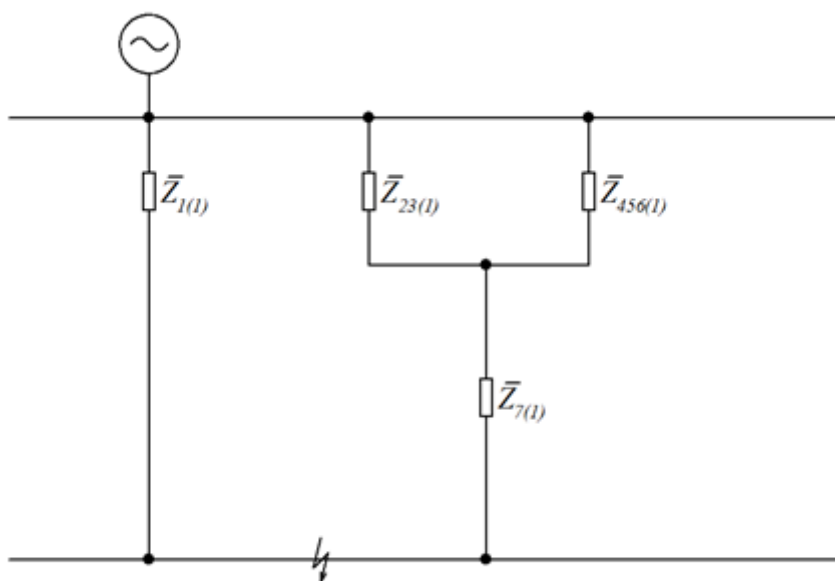
### Zjednodušování a výpočet celkové impedance

1)



Obr. 6.3 - zjednodušené náhradní schéma sítě (sousledná složka)

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1(1)} &= \bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{G1(1)} = j5,808 + j9,075 = j14,883 \, \Omega \\ \bar{Z}_{2(1)} &= \bar{Z}_{G2(1)} + \bar{Z}_{K2(1)} = j12,1 + (24\,200 + j2\,688,89) = 24\,200 + j2701 \, \Omega \\ \bar{Z}_{3(1)} &= \bar{Z}_{AM(1)} = j8642,86 \, \Omega \\ \bar{Z}_{4(1)} &= \bar{Z}_{G3(1)} + \bar{Z}_{T4(1)} = j9,68 + j8,07 = j17,75 \, \Omega \\ \bar{Z}_{5(1)} &= \bar{Z}_{S(1)} = j66,55 \, \Omega \\ \bar{Z}_{6(1)} &= \bar{Z}_{K3(1)} + \bar{Z}_{T3(1)} = j225 + j6,05 = j231,05 \, \Omega \\ \bar{Z}_{7(1)} &= \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{K1(1)} = j14,52 + j5 = j19,52 \, \Omega\end{aligned}$$

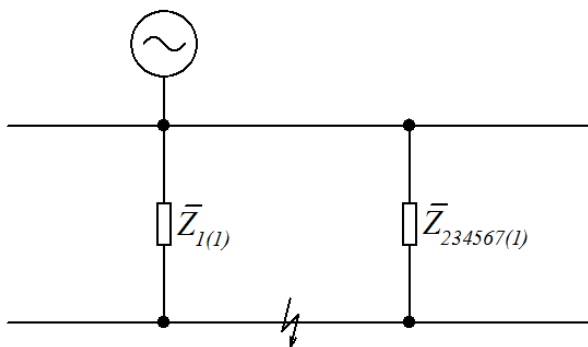


Obr. 6.4 - zjednodušené náhradní schéma sítě (sousedná složka)

$$\bar{Z}_{23(1)} = \frac{\bar{Z}_{2(1)} \cdot \bar{Z}_{3(1)}}{\bar{Z}_{2(1)} + \bar{Z}_{3(1)}} = \frac{(24\,200 + j2701) \cdot j8642,86}{(24\,200 + j2701) + j8642,86} = 2530,67 + j7456,6 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{456(1)} = \frac{\bar{Z}_{4(1)} \cdot \bar{Z}_{5(1)}}{\bar{Z}_{4(1)} + \bar{Z}_{5(1)}} + \bar{Z}_{6(1)} = \frac{j17,75 \cdot j66,55}{j17,75 + j66,55} + j231,05 = j245,06 \, \Omega$$

2)



Obr. 6.5 - zjednodušené náhradní schéma sítě (sousedná složka)

$$\bar{Z}_{234567(1)} = \frac{\bar{Z}_{23(1)} \cdot \bar{Z}_{456(1)}}{\bar{Z}_{23(1)} + \bar{Z}_{456(1)}} + \bar{Z}_{7(1)} = \frac{(2530,67 + j7456,6) \cdot j245,06}{(2530,67 + j7456,6) + j245,06} + j19,52 = 2,31 + j257,54 \, \Omega$$

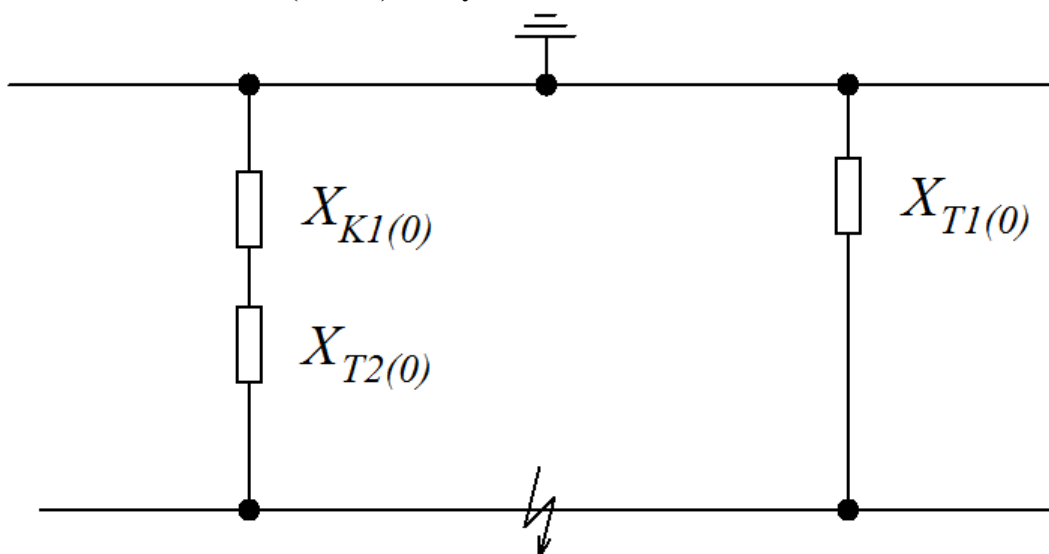
### 3) Celková sousledná impedance v komplexním tvaru

$$\bar{Z}_{c(1)} = \frac{\bar{Z}_{1(1)} \cdot \bar{Z}_{234567(1)}}{\bar{Z}_{1(1)} + \bar{Z}_{234567(1)}} = \frac{j14,883 \cdot (2,31 + j257,54)}{j14,883 + (2,31 + j257,54)} = 6,89 \cdot 10^{-3} + j14,07 \Omega$$

**Velikost sousledné impedance**

$$|\bar{Z}_{c(1)}| = \sqrt{(6,89 \cdot 10^{-3})^2 + 14,07^2} = 14,07 \Omega$$

**Náhradní schéma netočivé (nulové) složky**



Obr. 6.6 - náhradní schéma (nulová složka)

**Transformátory:**

$$X_{T1(0)} = X_{T1(1)} = 5,808 \Omega$$

$$X_{T2(0)} = 0,85 \cdot X_{T2(1)} = 0,85 \cdot 14,52 = 12,34 \Omega$$

**Kabel**

$$X_{K1(0)} = 3 \cdot X_{K1(1)} = 3 \cdot 5 = 15 \Omega$$

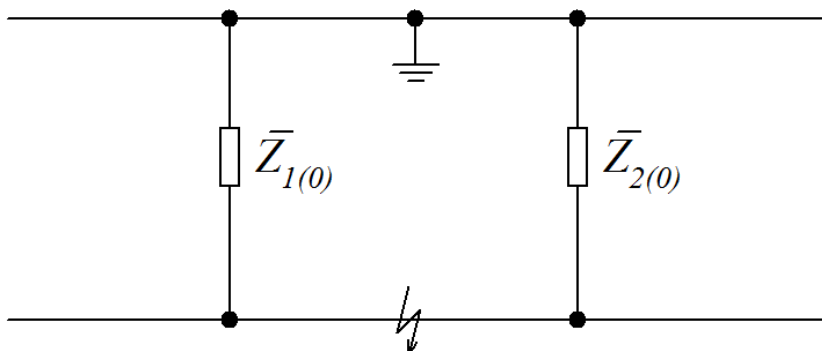
**Impedance nulové složky v komplexním tvaru**

$$\bar{Z}_{T1(0)} = 0 + j5,808 \Omega$$

$$\bar{Z}_{T2(0)} = 0 + j12,34 \Omega$$

$$\bar{Z}_{K1(0)} = 0 + j15 \Omega$$

## Zjednodušení



Obr. 6.7 - zjednodušené náhradní schéma (nulová složka)

$$\bar{Z}_{1(0)} = \bar{Z}_{T2(0)} + \bar{Z}_{K1(0)} = j12,34 + j15 = j27,34 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{2(0)} = \bar{Z}_{T1(0)} = j5,808 \, \Omega$$

$$\bar{Z}_{c(0)} = \frac{\bar{Z}_{1(0)} \cdot \bar{Z}_{2(0)}}{\bar{Z}_{1(0)} + \bar{Z}_{2(0)}} = \frac{j27,34 \cdot j5,808}{j27,34 + j5,808} = j4,79 \, \Omega$$

$$|\bar{Z}_{c(0)}| = \sqrt{0 + 4,79^2} = 4,79$$

### Počáteční trojfázový rázový zkratový proud

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_k}{|\bar{Z}_{c(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 14,07} = 4,96 \, kA$$

### Počáteční dvojfázový rázový zkratový proud

Můžeme uvažovat že  $\bar{Z}_{c(1)} = \bar{Z}_{c(2)}$

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_k}{2 \cdot |\bar{Z}_{c(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 110}{2 \cdot 14,07} = 4,3 \, kA$$

### Počáteční jednofázový rázový zkratový proud

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot I_V}{|\bar{Z}_{c(1)} + \bar{Z}_{c(2)} + \bar{Z}_{c(0)}|} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 0,525}{14,07 + 14,07 + 4,79} = 6,36 \, kA$$

### **Výpočet impedancí v poměrných jednotkách:**

Zde nebudou uváděna schémata zjednodušování – jsou stejné jako při výpočtu ve fyzikálních jednotkách – jediné co by bylo jiné, je místo velkých znaků impedance  $Z$ , by zde byly znaky malé  $z$

Vztažný výkon  $S_v = 100 \text{ MVA}$

Vztažné napětí  $U_v = 110 \text{ kV}$

#### **Soustava:**

$$x_{s(1)} = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 100}{200} = 0,55$$

#### **Transformátory:**

$$x_{T1(1)} = \frac{u_{kT1}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T1}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{250} = 0,048$$

$$x_{T2(1)} = \frac{u_{kT2}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T2}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{100} = 0,12$$

$$x_{T3(1)} = \frac{u_{kT3}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T3}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{100}{200} = 0,05$$

$$x_{T4(1)} = \frac{u_{kT4}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T4}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{100}{150} = 0,067$$

#### **Kabely:**

$$x_{K1(1)} = X_{KK1} \cdot l_{KK1} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,5 \cdot 10 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,041$$

$$x_{K2(1)} = X_{KK2} \cdot l_{KK2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,1 \cdot 20 \cdot \frac{100}{3^2} = 22,22$$

$$r_{K2(1)} = R_{KK2} \cdot l_{KK2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,9 \cdot 20 \cdot \frac{100}{3^2} = 200$$

$$x_{K3(1)} = X_{KK3} \cdot l_{k3} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,3 \cdot 30 \cdot \frac{100}{22^2} = 1,86$$

#### **Generátor (alternátor)**

$$x_{G1(1)} = \frac{x_{dG1}'' \cdot S_v}{S_{G1}} = \frac{0,15 \cdot 100}{200} = 0,075$$

$$x_{G2(1)} = \frac{x_{dG2}'' \cdot S_v}{S_{G2}} = \frac{0,1 \cdot 100}{100} = 0,1$$

$$x_{G3(1)} = \frac{x_{dG3}'' \cdot S_v}{S_{G3}} = \frac{0,12 \cdot 100}{150} = 0,08$$

#### **Asynchronní motor**

$$x_{AM(1)} = \frac{S_v}{i_z \cdot S_M} = \frac{100}{7 \cdot 0,2} = 71,43$$

#### **Poměrné impedance jako komplexní čísla**

$$\bar{z}_{s(1)} = 0 + j0,55$$

$$\bar{z}_{T1(1)} = 0 + j0,048$$

$$\bar{z}_{T2(1)} = 0 + j0,12$$

$$\begin{aligned}
\bar{z}_{T3(1)} &= 0 + j0,05 \\
\bar{z}_{T4(1)} &= 0 + j0,067 \\
\bar{z}_{K1(1)} &= 0 + j0,041 \\
\bar{z}_{K2(1)} &= 200 + j22,22 \\
\bar{z}_{K3(1)} &= 0 + j1,86 \\
\bar{z}_{G1(1)} &= 0 + j0,075 \\
\bar{z}_{G2(1)} &= 0 + j0,1 \\
\bar{z}_{G3(1)} &= 0 + j0,08 \\
\bar{z}_{AM(1)} &= 0 + j71,43
\end{aligned}$$

#### **Zjednodušování a výpočet celkové poměrné impedance (bez schémat)**

$$\begin{aligned}
\bar{z}_{1(1)} &= \bar{z}_{T1(1)} + \bar{z}_{G1(1)} = j0,048 + j0,075 = j0,123 \\
\bar{z}_{2(1)} &= \bar{z}_{G2(1)} + \bar{z}_{K2(1)} = j0,1 + (200 + j22,22) = 200 + j22,32 \\
\bar{z}_{3(1)} &= \bar{z}_{AM(1)} = j71,43 \\
\bar{z}_{4(1)} &= \bar{z}_{G3(1)} + \bar{z}_{T4(1)} = j0,08 + j0,067 = j0,147 \\
\bar{z}_{5(1)} &= \bar{z}_{s(1)} = j0,55 \\
\bar{z}_{6(1)} &= \bar{z}_{K3(1)} + \bar{z}_{T3(1)} = j1,86 + j0,05 = j1,91 \\
\bar{z}_{7(1)} &= \bar{z}_{T2(1)} + \bar{z}_{K1(1)} = j0,12 + j0,041 = j0,161
\end{aligned}$$

dále

$$\begin{aligned}
\bar{z}_{23(1)} &= \frac{\bar{z}_{2(1)} \cdot \bar{z}_{3(1)}}{\bar{z}_{2(1)} + \bar{z}_{3(1)}} = \frac{(200 + j22,32) \cdot j71,43}{(200 + j22,32) + j71,43} = 20,92 + j61,63 \\
\bar{z}_{456(1)} &= \frac{\bar{z}_{4(1)} \cdot \bar{z}_{5(1)}}{\bar{z}_{4(1)} + \bar{z}_{5(1)}} + \bar{z}_{6(1)} = \frac{j0,147 \cdot j0,55}{j0,147 + j0,55} + j1,91 = j2,03
\end{aligned}$$

dále

$$\bar{z}_{234567(1)} = \frac{\bar{z}_{23(1)} \cdot \bar{z}_{456(1)}}{\bar{z}_{23(1)} + \bar{z}_{456(1)}} + \bar{z}_{7(1)} = \frac{(20,92 + j61,63) \cdot (0,375 + j2,03)}{(20,92 + j61,63) + (0,375 + j2,03)} + j0,161 = j2,13$$

#### **Celková poměrná impedance sousledné složky v komplexním tvaru**

$$\bar{z}_{c(1)} = \frac{\bar{z}_{1(1)} \cdot \bar{z}_{234567(1)}}{\bar{z}_{1(1)} + \bar{z}_{234567(1)}} = \frac{j0,123 \cdot j2,13}{j0,123 + j2,13} = j0,116$$

#### **Velikost sousledné složky poměrné impedance**

$$|\bar{z}_{c(1)}| = \sqrt{0 + 0,116^2} = 0,116$$

#### **Náhradní schéma netočivé (nulové) složky (bez schémat)**

##### **Transformátory:**

$$\begin{aligned}
x_{T1(0)} &= x_{T1(1)} = 0,048 \\
x_{T2(0)} &= 0,85 \cdot x_{T2(1)} = 0,85 \cdot 0,12 = 0,102
\end{aligned}$$



**Kabel**

$$x_{K1(0)} = 3 \cdot x_{K1(1)} = 3 \cdot 0,041 = 0,123$$

**Poměrné impedance nulové složky v komplexním tvaru**

$$\bar{z}_{T1(0)} = 0 + j0,048$$

$$\bar{z}_{T2(0)} = 0 + j0,102$$

$$\bar{z}_{K1(0)} = 0 + j0,123$$

**Zjednodušení**

$$\bar{z}_{1(0)} = \bar{z}_{T2(0)} + \bar{z}_{K1(0)} = j0,102 + j0,123 = j0,225$$

$$\bar{z}_{2(0)} = \bar{z}_{T1(0)} = j0,048$$

$$\bar{z}_{c(0)} = \frac{\bar{z}_{1(0)} \cdot \bar{z}_{2(0)}}{\bar{z}_{1(0)} + \bar{z}_{2(0)}} = \frac{j0,225 \cdot j0,048}{j0,225 + j0,048} = j0,04$$

$$|\bar{z}_{c(0)}| = \sqrt{0 + 0,04^2} = 0,04$$

**Samotný výpočet zkratový proudů a výkonů**

Vztažný proud

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,525 \text{ kA}$$

**Počáteční trojfázový rázový zkratový proud**

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot I_V}{|\bar{z}_{c(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 0,525}{0,116} = 4,98 \text{ kA}$$

**Počáteční dvojfázový rázový zkratový proud**Můžeme uvažovat že  $\bar{z}_{c(1)} = \bar{z}_{c(2)}$ 

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3} c \cdot I_V}{2 \cdot |\bar{z}_{c(1)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 0,525}{2 \cdot 0,116} = 4,31 \text{ kA}$$

**Počáteční jednofázový rázový zkratový proud**

$$I''_{k1} = \frac{3 \cdot c \cdot I_V}{|\bar{z}_{c(1)} + \bar{z}_{c(2)} + \bar{z}_{c(0)}|} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 0,525}{0,116 + 0,116 + 0,04} = 6,37 \text{ kA}$$

## Závěr

V první části této práce jsou popsány zkratky obecně. Nejprve zde popisují rozdělení zkratů podle toho, zda se jedná o souměrný nebo nesouměrný zkrat. Mezi souměrné patří pouze trojfázový a trojfázový zemní. Ostatní zkratky jsou brány jako nesouměrné, a to z důvodu, že v trojfázové soustavě postihují pouze nějaké fáze a tato soustava se stává nesouměrnou z hlediska protékání proudů. Dále se zkratky dělí podle toho, přes co zkrat nastal. Ačkoliv při výpočtu zkratů uvažujeme, že vodivé spojení mezi fázemi, respektive mezi fázemi a zemí je dokonale vodivé, realita je mnohdy jiná. Ke spojení může dojít přes oblouk nebo přes materiál, který není považován za vodič. V tom případě se impedance zkratované sítě zvyšuje. To znamená, že se zkratový proud nemůže kvůli vyšší impedanci zvýšit a my proto můžeme (jak již bylo řečeno) zkrat brát jako dokonale vodivý. Další kritérium pro rozdělení zkratů je, zda se jedná o blízký nebo vzdálený zkrat. To se určí podle příspěvku zkratového proudu od asynchronních motorů a také vzdáleností od synchronních generátorů v síti. Na to hned navazuje samotná metodika výpočtů zkratových proudů, postup od určení náhradního schématu, použití souměrných složek přes výpočet zkratových impedancí jednotlivých prvků až po samotný výpočet souměrného rázového zkratového proudu. V mé práci se věnuji výpočtu impedancí a uvádím zde vzorce ve fyzikálních jednotkách. Existují dva způsoby výpočtu impedancí v náhradním schématu. Jak je zmíněno v poznámce pod vodorovnou čarou pro výpočet impedancí, je možnost také využít výpočty v poměrných jednotkách (to je ukázáno ve výpočtovém příkladu v poslední části práce). Oba způsoby výpočtu vedou ke stejným výsledkům souměrných rázových zkratových proudů.

V druhé části je obecně vysvětlena problematika účinků zkratových proudů vycházející z normy ČSN EN 60865-1. Nejprve je popsán tepelný účinek procházejícího proudu při zkratu. Jelikož se vodič při průchodu zkratového proudu, který má několikanásobně větší velikost než proud jmenovitý, zahřívá, je nutné tyto zařízení a části elektrizační soustavy dimenzovat, aby tyto proudy a jeho účinky vydržely. To samé platí pro dynamické účinky zkratových proudů. Při jejich působení na vodič dochází k silovému namáhání, a může dojít k poškození zařízení mechanickými silami.

V závěru práce je demonstrován příklad výpočtu zkratů v části zadané sítě. Použil jsem zde obě zmíněné metody výpočtů zkratových impedancí, a to jak ve fyzikálních jednotkách, tak i v poměrných jednotkách. Výsledky zkratových proudů by dle teorie měly vyjít shodně, ale je tu ovšem menší odchylka. Ta je způsobena nešťastně zvoleným vztažným výkonem při výpočtu impedancí v poměrných jednotkách. Tyto impedance poté vycházely jako velmi malá čísla a docházelo zde k chybě při zaokrouhlování, a z toho důvodu vyšla mírná odchylka při výsledných souměrných rázových zkratových proudech.

## Použitá literatura

- [1] KREJČÍ, Petr. *Cvičení z elektroenergetiky*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0471-9.
- [2] Hradílek, Zdeněk. *Elektroenergetika II.*; VŠB - Technická univerzita Ostrava: Ostrava, 1993. ISBN 80-7078-195-5.
- [3] Trojáněk, Zdeněk; Hájek, Josef; Kvasnica, Pavol. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*; SNTL/ALFA: Praha, 1987.
- [4] GURECKÝ, Jiří. *Přednáška, předmět: Přenos a rozvod elektrické energie, 3. ročník, zimní semestr: Téma: Zkrat*y. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016.
- [5] ČSN EN 60909-0 *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách část 0: Výpočet proudů*; 2002.
- [6] MEDVEC, Zdeněk. *Přednáška, předmět: Poruchy a chránění elektrických sítí, 3. ročník, letní semestr: Téma: Poruchy*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2017.
- [7] ČSN EN 60865-1 *Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody*; 2012.
- [8] Mišák, S. *Nelineární prvky* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.stanislav-misak.com>